



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

Vladimir Aicardo Melgarejo Carreño

Universidad nacional de Colombia

Facultad de ciencias agrarias

Área curricular desarrollo rural

Bogotá, D.C., Colombia

2019

Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

Vladimir Aicardo Melgarejo Carreño

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Doctor en agroecología

Directora:
Nohra León Rodríguez
MSc en economía del medio ambiente y recursos naturales
MSc en economía
PhD en ciencias económicas

Línea de investigación:
Agricultura y medio ambiente

Universidad nacional de Colombia
Facultad de ciencias agrarias
Área curricular desarrollo rural
Bogotá, D.C., Colombia
2019

*Dedico esta tesis al amor de mi vida y la luz de
mi corazón, mi amada esposa,
Sandra.*

Agradecimientos

Agradezco a Nohora León (PhD), Vicedecana Académica de la Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por su apoyo y aportes a esta investigación como directora.

Agradezco a Laure Morel (PhD), directora del laboratorio ERPI, ENSGSI, de la Universidad de Lorena, Francia, por su apoyo en mi estancia de investigación doctoral.

Agradezco a Sandra Bautista (PhD), profesora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central quien, como parte de mi comité asesor doctoral, me apoyo en el desarrollo metodológico de la investigación.

Resumen

La promoción de agroecosistemas que puedan proveer servicios ecosistémicos (SE) más allá de la producción de alimentos, está mediada por el nivel de aporte de estos servicios al bienestar de las comunidades y la capacidad de las comunidades para advertirlo. Esta mediación se materializa cuando una comunidad asigna importancia o valor a los SE. Proceso estudiado por la agroecología y la economía ecológica, logrando avances en la asignación no monetaria del valor. Sin embargo, la literatura no registra un vínculo formal entre estas dos ciencias con relación a la valoración de SE en agroecosistemas, pese a que comparten planteamientos teóricos similares que pueden ser integrados con este propósito. Así, en esta investigación, y mediante una revisión sistemática de literatura, se establecen y analizan teorías, dimensiones, enfoques y metodologías, para proponer una articulación teórica, conceptual y metodológica que es integrada en un modelo de valoración de SE en dinámica de sistemas, simulando su aplicación en un agroecosistema tipo.

Palabras clave: multidimensionalidad del valor, agroecología, economía ecológica, sistemas complejos, dinámica de sistemas, modelación.

Abstract

The promotion of agroecosystems that can provide ecosystem services (ES) beyond food production is mediated by the level of contribution of these services to the well-being of communities and the capacity of communities to warn. This mediation materializes when a community assigns importance or value to the ES, such assignment process is studied by the sciences of Agroecology and Ecological Economics, achieving advances in the non-monetary assignment of value, however, the literature does not register a formal link between these two sciences in relation to the valuation of ES in agroecosystems, although they share similar theoretical approaches, which can be integrated for valuation. Thus, in this research, and through a systematic review of the literature, theories, dimensions, approaches and methodologies of the two sciences were established and analyzed in order to propose a theoretical, conceptual and methodological articulation, which is integrated into an SE valuation in system dynamic model, simulating its application in an agroecosystem "type".

Keywords: **value multidimensionality, agroecology, ecological economics, complex systems, systems dynamics, modeling.**

Contenido

Introducción	1
1. Aproximaciones conceptuales y teóricas a la valoración de SE en agroecosistemas	7
1.1 Aproximaciones conceptuales.....	7
1.1.1 Agroecología	7
1.1.1.1 Agroecosistema	14
1.1.1.2 Del concepto de agroecosistema al concepto de agroecosistema sostenible	28
1.1.2 Economía ecológica	29
1.1.3 Servicios ecosistémicos	33
1.1.3.1 Servicios ecosistémicos en agroecosistemas sostenibles	40
1.2 Aproximaciones teóricas.....	47
1.2.1 Teoría de sistemas	47
1.2.1.1 Agroecosistemas como sistemas complejos	48
1.2.2 Teoría de la sostenibilidad fuerte	49
1.2.3 Teoría del valor.....	50
1.2.3.1 La valoración de SE.....	53
1.3 Estableciendo el valor multidimensional.....	56
1.3.1 Dimensión del valor ecológico.....	57
1.3.2 Dimensión del valor sociocultural	58
1.3.3 Dimensión del valor tecnológico	59
1.3.4 Dimensión del valor económico.....	60
1.3.5 Dimensión del valor político.....	61
1.4 Direccionando la valoración: los enfoques	61
1.4.1 Enfoque transdisciplinario	62
1.4.2 Enfoque sistémico	62
1.4.3 Enfoque ecológico	62
1.4.4 Enfoque multidimensional	62
1.4.5 Enfoque participativo	63
1.5 Articulación de las bases conceptuales y teóricas	63
2. Aportes metodológicos desde la EE a la valoración de SE	66
2.1 Dimensiones, principios y criterios de valoración.....	70
2.2 Metodologías de valoración de SE desde la EE	78
2.2.1 Relaciones entre funciones ecosistémicas, SE y metodologías de valoración	85
2.2.2 Relaciones entre dimensiones y metodologías de valoración.....	86
2.2.3 Análisis temporal de uso de metodologías de valoración	89
2.2.4 Descripción de metodologías de valoración desde la EE	89
2.2.4.1 Metodología de valoración multicriterio	89
2.2.4.2 Metodologías de valoración deliberativas – consultivas.....	90
2.2.4.3 Metodologías de valoración mediante balances energéticos o biofísicos	93
2.2.4.4 Metodología de valoración basada en lógica difusa.....	95
2.2.4.5 Metodología de valoración mediante modelación basada en agentes.....	96
2.2.4.6 Metodología de valoración mediante modelación en dinámica de sistemas	97
2.2.4.7 Comparación de metodologías de valoración	98
2.2.5 Dinámica de sistemas en valoración de SE en agroecosistemas	99
2.3 Marco de valoración de SE en agroecosistemas sostenibles	105

3. Metodología de valoración de SE mediante modelación en dinámica de sistemas ...	109
3.1 Paso 1 - articulación del problema y conceptualización	109
3.2 Paso 2 - formulación de las hipótesis dinámicas parciales	109
3.3 Paso 3 - definición del modelo general de valoración: ciclo causal integrado.....	112
3.4 Paso 4 - método para la definición del agroecosistema tipo (AT).....	112
3.5 Paso 5 - formalización del modelo.....	113
3.6 Paso 6 - método de validación del modelo.....	115
3.7 Paso 7 - análisis de resultados	116
4. Modelo general de valoración de SE basado en dinámica de sistemas	117
4.1 Paso 1 - articulación del problema y conceptualización	117
4.2 Paso 2 - hipótesis dinámicas parciales.....	117
4.2.1 Ciclos causales de la dimensión ecológica	118
4.2.2 Ciclos causales de la dimensión sociocultural	127
4.2.3 Ciclos causales de la dimensión económica	134
4.2.4 Ciclos causales de la dimensión tecnológica	140
4.2.5 Ciclos causales de la dimensión política	145
4.3 Paso 3 - modelo general de valoración - ciclo causal integrado.....	150
5. Simulación del modelo en el agroecosistema tipo	153
5.1 Paso 4 - establecimiento del agroecosistema tipo para valoración de SE.....	153
5.1.1 Identificación de agroecosistemas sostenibles	153
5.1.2 Matriz de calificación	154
5.2 Paso 5 - formalización del modelo.....	155
5.2.1 Supuestos del modelo	155
5.2.2 Ecuaciones del modelo	157
5.2.2.1 Dimensión ecológica.....	158
5.2.2.2 Dimensión sociocultural.....	162
5.2.2.3 Dimensión tecnológica.....	164
5.2.2.4 Dimensión económica	166
5.2.2.5 Dimensión política	169
5.3 Paso 6 - validación	171
5.3.1 Aporte al conocimiento y la comprensión del sistema.....	171
5.3.2 Correspondencia de la estructura del modelo	172
5.3.3 Correspondencia del comportamiento modelado.....	173
5.4 Paso 7 - análisis de resultados	173
5.4.1 Dimensión ecológica	173
5.4.2 Dimensión sociocultural.....	180
5.4.3 Dimensión tecnológica	183
5.4.4 Dimensión económica	186
5.4.5 Dimensión política	190
5.4.6 Unidad de valor de SE – UVSE	192
5.4.6.1 Valoración de SE de regulación	197
5.4.6.2 Valoración de SE de hábitat	200
5.4.6.3 Valoración de SE de producción	201
5.4.6.4 Valoración de SE de información	203
6. Conclusiones y recomendaciones	207
6.1 Conclusiones	207
6.2 Recomendaciones.....	210

A. Anexo: análisis de relaciones	211
B. Anexo: encuesta de validación	212
C. Anexo: criterios e indicadores de valoración de SE en AS.....	213
D. Anexo: cálculo de indicadores y soportes estadísticos.....	214
Bibliografía	215

Lista de figuras

Figura 1-1. Línea de tiempo en la evolución del concepto de agroecología	13
Figura 1-2. Diferencias entre ecosistemas naturales y agroecosistemas	16
Figura 1-3. Conceptos asociados al agroecosistema.....	18
Figura 1-4. Macroaspectos de sostenibilidad del agroecosistema.....	21
Figura 1-5. Propuesta de análisis sobre el aporte de los agroecosistemas al bienestar.....	24
Figura 1-6. Clasificación de los servicios ecosistémicos MEA	36
Figura 1-7. Clasificación de SE y categorías de valores humanos	37
Figura 1-8. Clasificación SE intermedios y finales.....	38
Figura 1-9. Representación conceptual de SE en los dominios biofísico y social.....	39
Figura 1-10. La biodiversidad en el funcionamiento de los agroecosistemas y la provisión de SE	41
Figura 1-11. Aproximación multidimensional de sostenibilidad y valoración.....	56
Figura 1-12. Valoración multidimensional de SE en agroecosistemas.....	57
Figura 1-13. Articulación de las bases teóricas y conceptuales para la valoración de SE en AS	64
Figura 2-1. Distribución geográfica de los expertos	68
Figura 2-2. Distribución de los expertos por filiación	69
Figura 2-3. Publicaciones anuales en valoración de SE	71
Figura 2-4. Número de documentos vs principios de valoración de SE en agroecosistemas.....	76
Figura 2-5. Número de documentos vs criterios de valoración de SE en agroecosistemas	77
Figura 2-6. Documentos y nivel de utilización de las metodologías de valoración.....	78
Figura 2-7. Métodos de valoración desde la economía ecológica.....	79
Figura 2-8. Número de documentos vs funciones ecosistémicas en agroecosistemas	85
Figura 2-9. ACP: funciones ecosistémicas en agroecosistemas y metodologías de valoración	86
Figura 2-10. Publicaciones vs dimensiones de valoración	86
Figura 2-11. Número de publicaciones vs dimensiones de valoración analizadas	87
Figura 2-12. Documentos vs metodologías de valoración de economía ecológica.....	88
Figura 2-13. ACP: correlación de dimensiones de valoración y metodologías de valoración	88
Figura 2-14. Evolución temporal - metodologías de valoración desde la economía ecológica	89
Figura 2-15. Árbol de decisión	95
Figura 2-16. Definición de subconjuntos difusos	96
Figura 2-17. Mapa conceptual sobre el modelamiento en dinámica de sistemas	97
Figura 2-18. Marco de valoración de SE en Agroecosistemas Sostenibles	106
Figura 3-1. Visión general de ciclos causales de retroalimentación	110
Figura 3-2. Ejemplo de relaciones entre variables	110
Figura 3-3. Ejemplo de ciclo causal reforzado.....	111

Figura 3-4. Ejemplo de ciclo causal balanceado	111
Figura 3-5. Ejemplo de diagrama de almacenamiento (stock) y flujo.....	115
Figura 4-1. Ciclos causales de la dimensión ecológica de valoración de SE.....	124
Figura 4-2. Ciclos causales de la dimensión sociocultural de valoración de SE.....	131
Figura 4-3. Ciclos causales de la dimensión económica de valoración de SE.....	138
Figura 4-4. Ciclos causales de la dimensión tecnológica de valoración de SE.....	142
Figura 4-5. Ciclos causales de la dimensión política de valoración de SE.....	149
Figura 4-6. Modelo general de valoración – ciclo causal integrado.....	151
Figura 5-1. Modelo formal de valoración	157
Figura 5-2. Modelación: dinámica de sombra (DS)	174
Figura 5-3. Modelación: prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA).....	175
Figura 5-4. Modelación: materia orgánica en el suelo (MOs).....	176
Figura 5-5. Modelación: actividad biológica en el suelo (Abs).....	177
Figura 5-6. Modelación: fertilizantes orgánicos generados (N, P).....	178
Figura 5-7. Modelación: fertilizantes orgánicos generados (K, Mg)	179
Figura 5-8. Modelación: captura de CO ₂	180
Figura 5-9. Modelación: pérdida de cosechas (PC)	181
Figura 5-10. Modelación: índice de seguridad alimentaria (ISA).....	182
Figura 5-11. Modelación: participación en concejos comunitarios	183
Figura 5-12. Modelación: estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV).....	184
Figura 5-13. Modelación: energía generada por el agroecosistema (EGA)	185
Figura 5-14. Modelación: prácticas agroecológicas locales (PAL).....	185
Figura 5-15. Modelación: prácticas de control biológico (PCB).....	187
Figura 5-16. Modelación: balance energético (BE)	188
Figura 5-17. Modelación: rendimiento del café pergamo seco	189
Figura 5-18. Modelación: diversificación de ingresos (DI).....	189
Figura 5-19. Modelación: calidad de vida (CV).....	190
Figura 5-20. Modelación: capacitación y sensibilización ambiental (CSA).....	191
Figura 5-21. Modelación: factor de acceso a crédito (AC)	192
Figura 5-22. Modelación: aporte de UVSE por indicador	194
Figura 5-23. UVSE: funciones de regulación, producción, hábitat e información.....	195
Figura 5-24. UVSE: funciones de regulación.....	199
Figura 5-25. UVSE: funciones de hábitat	201
Figura 5-26. UVSE: funciones de producción.....	203
Figura 5-27. UVSE: funciones de información.....	205

Lista de tablas

Tabla 1-1. Atributos de sostenibilidad en agroecosistemas	26
Tabla 1-2. Funciones, procesos y servicios de los ecosistemas	34
Tabla 1-3. Procesos y escala de los SE en agroecosistemas	42
Tabla 1-4. Servicios ecosistémicos en agroecosistemas sostenibles	43
Tabla 1-5. Comparación de la teoría neoclásica del valor y la teoría alternativa	52
Tabla 2-1. Estrategia de búsqueda.....	66
Tabla 2-2. Dimensiones, principios y criterios de valoración de SE en agroecosistemas sostenibles.....	71
Tabla 2-3. Metodologías de valoración de SE en agroecosistemas desde la EE	80
Tabla 2-4. Comparación de metodologías de valoración	99
Tabla 2-5. Características de las metodologías de valoración de SE en agroecosistemas	107

Tabla 4-1. Indicadores de la dimensión ecológica de valoración de SE	118
Tabla 4-2. Indicadores de la dimensión sociocultural de valoración de SE.....	127
Tabla 4-3. Indicadores de la dimensión económica de valoración de SE	134
Tabla 4-4. Indicadores de la dimensión tecnológica de valoración de SE	140
Tabla 4-5. Indicadores de la dimensión política de valoración de SE	145
Tabla 5-1. Matriz de selección del agroecosistema tipo.....	154
Tabla 5-2. Supuestos de modelación del agroecosistema tipo	156
Tabla 5-3. Indicadores y SE valorados para la dimensión ecológica	160
Tabla 5-4. Indicadores y SE valorados para la dimensión sociocultural	163
Tabla 5-5. Indicadores y SE valorados para la dimensión tecnológica	165
Tabla 5-6. Indicadores y SE valorados para la dimensión económica	168
Tabla 5-7. Indicadores y SE valorados para la dimensión política	170
Tabla 5-8. Cálculo de MAPE para indicadores seleccionados	173
Tabla 5-9. Modelo formal: servicios ecosistémicos de regulación valorados	197
Tabla 5-10. Modelo formal: servicios ecosistémicos de hábitat valorados.....	200
Tabla 5-11. Modelo formal: servicios ecosistémicos de producción valorados	202
Tabla 5-12. Modelo formal: servicios ecosistémicos de información valorados	203

Introducción

La superficie terrestre está cubierta en un 40% de tierras de cultivo y pastizales manejados bajo modelos de intensificación agrícola que dan como resultado la pérdida de la biodiversidad y la reducción de los beneficios que proveen los ecosistemas a los seres humanos y que contribuyen a hacer la vida posible y digna, denominados servicios ecosistémicos (SE) (Foley et al., 2011). La evaluación de ecosistemas del milenio (MEA, 2005) encontró que, en los últimos 50 años a nivel mundial el suministro de SE como el control biológico de plagas y la polinización han disminuido, en mayor medida como consecuencia del cambio de uso de la tierra a uso intensivo agrícola, cambios que no afectan de igual manera a todos los SE. Por ejemplo, se aumentan las tierras que pueden proveer servicios de aprovisionamiento como alimentos y fibras, y paralelamente se reducen tierras que aportan servicios de regulación hídrica y conservación de la biodiversidad. Consecuencia que resalta la importancia de encontrar alternativas de manejo, para conciliar la producción agrícola con la conservación de los SE y su provisión (Gliessman, 2002; Altieri & Nicholls, 2004; Altieri & Nicholls, 2010; Altieri, Koohofkan & Giménez, 2012; Martín & Osorio, 2012; Ratnadass, Fernández, Avelino & Habib, 2012).

La producción agrícola se realiza en espacios llamados agroecosistemas objeto de estudio de la agroecología, definición que presenta amplias discusiones. Gliessman et al. (2007) plantean al agroecosistema como un sistema, con capacidad de resiliencia ante los cambios biofísicos, socioeconómicos y políticos, donde coexisten relaciones entre los procesos ecológicos, económicos y sociales que inciden en los subsistemas agrícola, pecuario, forestal e hídrico que lo componen, como en las funciones y servicios ecosistémicos que provee. Reconociendo al ser humano y su contexto social, como factores influyentes en la toma de decisiones del quehacer en el agroecosistema (Gliessman, 2002; Altieri & Toledo, 2011).

La promoción de agroecosistemas que puedan proveer SE más allá de la producción de alimentos está mediada por el nivel de aporte de los SE al bienestar de las comunidades y la capacidad de las comunidades para advertirlo. Este aporte es fácilmente percibido cuando se trata de SE que tienen valor monetario como la provisión de alimentos y es más difícil de evidenciar cuando los SE no son transados en el mercado, como los SE de regulación del clima, preservación de hábitats, retención del suelo, entre otros (La-Roca, 2010).

La asignación de importancia, significación o valor, se convierte en un proceso supeditado al juicio o comprensión de un grupo humano, enmarcado en un contexto biofísico, sociopolítico, cultural y temporal particular (Martínez-Alier et al., 1998). Con el propósito de conciliar la producción agrícola con la conservación, la valoración de los SE parece ser una aproximación apropiada. Según La Roca (2010) la trascendencia de la valoración radica en que ayuda a visibilizar aquellos elementos del funcionamiento de los agroecosistemas que contribuyen directa o indirectamente al bienestar humano que, aunque no posean valor monetario, sí cuentan con valor ecológico, sociocultural, tecnológico, económico o político.

En este reto de “hacer evidente” el valor de los SE, la economía ecológica plantea la necesidad de realizar cambios epistemológicos fundamentales en los lenguajes de valoración utilizados. La imposición de ciertos lenguajes (desde lo monetario) y la eliminación de otros desde lo social, cultural y político “incrementan los conflictos ambientales debido a la discrepancia de valoración dentro de un único sistema (la monetización)” (Martínez-Alier, 2006, p.12).

La acción de asignar un valor a los servicios ecosistémicos (SE) tiene un rol fundamental en la toma de decisiones sobre el diseño y el manejo de los agroecosistemas. Proceso que requiere de reflexiones teóricas, para comprender la importancia de los SE en el bienestar humano.

En tal contexto se desarrolla esta investigación, justificada en la necesidad de identificar y establecer enfoques integradores entre la agroecología y la economía ecológica para contribuir claramente a la valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas.

Por otra parte, la importancia de profundizar en la comprensión de las interrelaciones entre los servicios ecosistémicos, el agroecosistema y los factores que pueden incidir en la dinámica de los servicios y en su valoración requiere de aproximaciones metodológicas transdisciplinares. En tal sentido, esta investigación identifica la necesidad de proponer metodologías y herramientas de modelación considerando el agroecosistema como sistema complejo.

El problema de investigación se plantea desde la necesidad de establecer e integrar los elementos teóricos y metodológicos, aportados por la agroecología y la economía ecológica, para valorar los servicios ecosistémicos en agroecosistemas y contribuir a su sostenibilidad. Las preguntas que guían el proceso de investigación son:

¿Qué elementos teóricos desde la agroecología y desde la economía ecológica pueden contribuir a la valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas?

¿Qué mecanismos puede aportar la economía ecológica, para la valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas?

La investigación doctoral establece como objetivo general el contribuir teórica y metodológicamente, desde la economía ecológica y la agroecología, al diseño de mecanismos para la valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas.

Los objetivos específicos de la investigación son:

- Definir las bases teóricas que, desde la agroecología y la economía ecológica, permitan el abordaje integral de la valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas.
- Determinar los instrumentos metodológicos que, desde la economía ecológica y la agroecología, permitan el diseño de un modelo general de valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas.
- Realizar la simulación del modelo general de valoración de servicios ecosistémicos en un agroecosistema tipo.

El logro de la valoración de los SE requiere de principios teóricos vinculantes entre la agroecología y la economía ecológica que puedan interpretar las potencialidades y limitaciones de los espacios biofísicos, los ecosistemas, las relaciones ecológicas, socioculturales, económicas, tecnológicas y políticas. En este sentido la investigación se desarrolla en cinco capítulos:

En el primer capítulo se plantea una reflexión conceptual a las ciencias de la agroecología y la economía ecológica, al igual que a los servicios ecosistémicos y el agroecosistema, a partir de las contribuciones de diferentes autores. De allí se resalta la necesidad de diferenciar entre el concepto de agroecosistema y el concepto de agroecosistema sostenible. Encontrando tres rasgos fundamentales del agroecosistema sostenible (AS), el primero el ser diseñado y manejado como un sistema complejo, el segundo el implementar macroaspectos de sostenibilidad y el tercero el aporte del AS al bienestar de las comunidades. Rasgos discutidos en el capítulo 1 y

finalmente integrados al concepto propuesto en esta investigación. La definición de AS permite identificar y compilar los SE generados, para ser posteriormente analizados y valorados.

En este capítulo también se identifican teorías transversales a las ciencias abordadas dentro del problema de investigación y se discute su aporte en la valoración de SE en agroecosistemas. Se consideran las teorías de sistemas, de sostenibilidad fuerte y del valor. En la reflexión teórica se examina la relevancia de considerar a los agroecosistemas como sistemas complejos. Aspecto que tiene implicaciones en la forma de comprender las relaciones agroecosistemas – servicios ecosistémicos y en la definición de metodologías para valorar los SE. La discusión sobre el concepto del valor desde la economía ecológica, muestra la necesidad de establecer marcos de valoración que amplíen los lenguajes utilizados y sean insumo fundamental en la toma de decisiones que favorezcan los SE. Como resultado de la articulación de las aproximaciones conceptuales y teóricas, se establece el valor multidimensional de los SE y se plantean los enfoques transversales que direccionan los procesos de valoración.

Partiendo del valor multidimensional de los SE, discutido en el capítulo 1 y la integración de las bases conceptuales y teóricas desde las dos ciencias, en el segundo capítulo denominado aportes metodológicos, se propone un marco de valoración conformado por dimensiones, principios, criterios e indicadores. Se parte de la premisa que existen unas bases o principios para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles, cuyo nivel de cumplimiento, medido a través de criterios, demuestra el valor que los SE tienen para el funcionamiento del agroecosistema. Las relaciones entre dimensiones, principios, criterios, funciones y SE se especifican en el anexo A.

La definición de principios y criterios utilizados en el marco de valoración, se realiza mediante una revisión sistemática de literatura y una consulta a expertos nacionales e internacionales descrita en el anexo B. La revisión permite involucrar en la investigación las percepciones y aportes de diferentes comunidades. Aportes que han sido recogidos por los autores en los resultados de sus investigaciones.

En la revisión de literatura se identifican 63 documentos que proponen metodologías y herramientas que permiten valorar los SE desde la economía ecológica. Se discriminan las metodologías de valoración como son: valoración multicriterio, valoración deliberativa – consultiva, valoración mediante modelación en dinámica de sistemas, valoración mediante balances energéticos o biofísicos, valoración mediante lógica difusa y valoración por medio de modelación basada en agentes.

Las metodologías fueron estudiadas y comparadas para seleccionar la más apropiada para implementar el marco de valoración propuesto. Es decir, aquella que logra incluir la “no linealidad”, las sinergias, los comportamientos emergentes, las interrelaciones, las causalidades y demás aspectos a considerar. Adicionalmente, se analizan las formas en que las metodologías incorporan las funciones ecosistémicas, los SE y las dimensiones del valor. Como resultado se selecciona la valoración mediante modelación en dinámica de sistemas para ser implementada en los capítulos posteriores.

En el tercer capítulo se asume el marco de valoración bajo la modelación en dinámica de sistemas, metodología que se propone para comprender las relaciones y retroalimentaciones entre las decisiones políticas, las acciones humanas y la preservación, transformación o menoscabo de los SE en el agroecosistema, generando información relevante para la valoración de los SE. Las relaciones identificadas se describen mediante ecuaciones, funciones o gráficas.

La modelación en dinámica de sistemas permite desarrollar análisis cuantitativos y cualitativos, proyección de escenarios, determinación de variables críticas, inclusión del análisis multicriterio, modelamiento matemático y utilización de software para análisis de comportamientos emergentes y sinergias. Características que permiten generar conocimiento relevante en los procesos de toma de decisiones y para las comunidades que se benefician de la valoración de los SE.

Se establece la metodología de valoración de SE mediante modelación en dinámica de sistemas que consta de siete pasos generales (Abaunza et al., 2011; Forrester, 2013; Ferreira et al., 2016; Espinoza, Bautista, Narváez, Alfaro, & Camargo, 2017). El primer paso es la articulación del problema y su conceptualización. El segundo paso es la formulación de las hipótesis dinámicas parciales mediante la definición de ciclos causales por cada dimensión de valoración. El tercero es la definición del modelo general de valoración, el cual integra los ciclos causales parciales de cada dimensión. El cuarto es la definición del agroecosistema tipo. El quinto es la formalización del modelo general en el agroecosistema tipo, mediante el establecimiento de ecuaciones, funciones gráficas o reglas de decisión. El sexto, es la validación del modelo aplicado al agroecosistema tipo. Finalmente, el séptimo es el análisis de resultados para establecer los niveles de importancia o valor asociados a los SE. En el capítulo 3 se describen los siete pasos de la propuesta metodológica adaptada de la modelación en dinámica de sistemas, para la valoración de SE en agroecosistemas.

La metodología de valoración de SE mediante modelación en dinámica de sistemas se desarrolla durante la estancia de investigación doctoral en el laboratorio ERPI (equipo de investigación en procesos innovadores) de la escuela nacional superior en ingeniería de sistemas de innovación ENSGSI (Université de Lorraine, France), desde el mes de septiembre de 2017 al mes de septiembre de 2018.

En el cuarto capítulo se desarrollan los tres primeros pasos de la metodología de valoración establecida en el capítulo 3:

Paso 1: la articulación del problema y su conceptualización se desarrolla en los capítulos 1 y 2. Los indicadores del marco de valoración que son integrados al modelo se especifican en los anexos C y D.

Paso 2: formulación de las hipótesis dinámicas mediante la definición de ciclos causales parciales. Los indicadores son empleados para la construcción de las hipótesis dinámicas parciales que finalmente, constituyen los ciclos causales en cada dimensión del valor. Los indicadores reflejan la medición de las funciones ecosistémicas y de los SE derivados. La identificación de las relaciones, influencias e interdependencias entre los indicadores permiten plantear las hipótesis dinámicas parciales.

Paso 3: el modelo general de valoración integra los ciclos causales parciales que se componen de indicadores de diferentes dimensiones del valor. Se observa como los principios y criterios pueden ser Interdimensionales, resaltando la complejidad del sistema. El modelo al ser de carácter general es una aproximación conceptual a la comprensión de las relaciones, influencias e interdependencias que se establecen en el agroecosistema sostenible para la generación y valoración de los SE.

En el capítulo quinto se desarrolla la simulación del modelo en el agroecosistema tipo, a través de los pasos 4 a 7 de la metodología de valoración propuesta:

Paso 4: selección del agroecosistema tipo sobre el cual se realiza la simulación del modelo. Se identifican sistemas de producción que corresponden con la definición propuesta de agroecosistema sostenible. Los sistemas han sido trabajados por varios autores desde una o más

dimensiones del valor e incluyen información relacionada con los indicadores que conforman los ciclos causales parciales. Posteriormente se proponen características deseables y se procede a realizar una calificación para seleccionar el agroecosistema tipo.

Paso 5: la formalización del modelo general requiere la definición de los supuestos, es decir la caracterización base de las condiciones del agroecosistema tipo. Se realiza la selección de los indicadores que se deriva de la existencia y acceso a la información para su cálculo y la pertinencia para explicar adecuadamente las hipótesis causales planteadas en el capítulo 4. Luego de seleccionados los indicadores, se clasifican en endógenos y exógenos. Los indicadores endógenos son influenciados directamente por otros indicadores o son calculados por el modelo, los indicadores exógenos son los que actúan como causa, influencian otros indicadores, o se calculan con datos independientes del sistema (Sterman, 2002).

Paso 6: simulación y validación del modelo aplicado al agroecosistema tipo. La validación del modelo formal en dinámica de sistemas evalúa la calidad del modelo y los resultados obtenidos con la realidad del sistema modelado. A partir de las reflexiones de Forrester (1985), Forrester y Senge (1996), Godoy y Bartó (2002), Sargent (2009), Qudrat-Ullah y Seong (2010) se plantea la validación desde tres aspectos: **el aporte al conocimiento y la comprensión del sistema, la correspondencia de la estructura del modelo con el sistema y la correspondencia entre el comportamiento modelado y el comportamiento real del sistema.**

Paso 7: análisis de resultados, para establecer los niveles de importancia o valor de los SE asociados a cada dimensión del valor. El comportamiento de los indicadores es calculado mediante ecuaciones y funciones gráficas que son simuladas en el software Stella®. Simulación que permite determinar las relaciones entre los indicadores de las diversas dimensiones del valor en el tiempo. Finalmente, derivado del análisis de los resultados, se propone una unidad de valor de servicio ecosistémico (UVSE) multidimensional (ecológica, sociocultural, política, tecnológica y económica) que permite evidenciar la relación entre los indicadores y los SE valorados.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones considerando los resultados obtenidos y se proponen posibilidades de investigación desde la articulación teórica y conceptual de la economía ecológica y la agroecología.

El proceso investigativo aporta a la discusión de la valoración de servicios ecosistémicos desde lo teórico y lo metodológico. **La conceptualización desde la agroecología y la economía ecológica aborda la valoración desde las aproximaciones teóricas:** sistemas, sostenibilidad fuerte y valor. Aproximaciones que fundamentan la propuesta del valor multidimensional de los SE. Adicionalmente, se plantean cinco enfoques transversales que direccionan los procesos de valoración en agroecosistemas.

Como primer aporte metodológico se resalta el marco de valoración compuesto por dimensiones, principios y criterios. La aplicación de las dimensiones se realiza mediante 12 principios y 36 criterios. El nivel de cumplimiento del principio, medido a través de los criterios, muestra el valor que los SE tienen para el funcionamiento de un agroecosistema. **El segundo aporte es la propuesta de una metodología de valoración basada en modelación en dinámica de sistemas, abordando la valoración de los SE desde los enfoques transdisciplinar, sistémico, ecológico, multidimensional y participativo.**

Los aportes teóricos y metodológicos contribuyen a enriquecer los lenguajes, enfoques y métodos utilizados en los procesos de valoración. La asignación de importancia o valor a los SE repercute en la toma de decisiones que contribuyen a la sostenibilidad de los agroecosistemas.

1. Aproximaciones conceptuales y teóricas a la valoración de SE en agroecosistemas

En este capítulo se realiza una aproximación teórica a los conceptos de agroecología, economía ecológica (EE) y servicios ecosistémicos (SE). Se identifican las teorías base para el desarrollo de las ciencias abordadas dentro del problema de investigación, además de los conceptos y clasificaciones de los servicios ecosistémicos y sus relaciones con los agroecosistemas. En este sentido, se explora la teoría de sistemas, la teoría de la sostenibilidad fuerte y la teoría del valor, las cuales se encuentran ligadas a la conceptualización, teorización y modelación de la agroecología y la economía ecológica. La aproximación teórica, además identifica desde estas ciencias los enfoques trasversales que deben ser incorporados a la valoración de SE en agroecosistemas.

Por otra parte, se analiza el agroecosistema desde la evolución de su concepto, su estructura, componentes, criterios de sostenibilidad y las relaciones entre las dimensiones ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política. Dimensiones que reconfiguran la visión de agroecosistema y la valoración de los servicios ecosistémicos. Se establece el valor multidimensional y se propone el concepto de agroecosistema sostenible. Finalmente, se genera un modelo teórico de valoración que pueda ser aplicado a un agroecosistema tipo para contribuir a su sostenibilidad.

1.1 Aproximaciones conceptuales

En este numeral se tratan los conceptos relacionados con las ciencias de la agroecología y la economía ecológica. Se discuten los conceptos de agroecosistema, servicios ecosistémicos y agroecosistema sostenible. Asimismo, se identifican los servicios ecosistémicos que pueden ser generados por los agroecosistemas sostenibles.

1.1.1 Agroecología

Jackson (2002) citado por Vandermeer y Perfecto (2013, p. 57), describe que el desarrollo de la agricultura, como una forma de obtener energía con mayor eficiencia que las actividades de caza y recolección, permitió el aumento de la población de las primeras comunidades humanas. Sin embargo, la agricultura se encontraba restringida a las leyes ecológicas y la producción de los primeros sistemas agrícolas se enmarcaba dentro de estas limitaciones. Estos sistemas iniciales fueron denominados “sistemas naturales de agricultura”.

Posteriormente al introducir en la agricultura herramientas generadas por la revolución industrial, se remplazó el trabajo humano y los procesos ecológicos por maquinaria, combustibles fósiles y sus derivados. Como plantean Pimentel et al. (1973) citado por Vandermeer y Perfecto (2013, p. 57) se convirtió el sistema agrícola de un sistema productor de energía en forma de alimentos a un sistema consumidor de energía, es decir, un sistema que consume más energía de la que produce.

Por su parte, Patel (2010) citado por Vandermeer y Perfecto (2013, p. 57) estipula que actualmente la crisis ambiental creada por el sistema agrícola comienza a tomar gran atención académica, ya que existe poca evidencia que el modelo agrícola haya conducido a un aumento real a nivel global de la seguridad alimentaria. Esta realidad ha derivado que el modelo agrícola sea cuestionado y se genere gran atención a la evolución de la agroecología como ciencia, práctica y movimiento

social. La evolución del concepto de agroecología es consecuencia de la historia de la agricultura, la cual cobró gran importancia en época posterior a los conflictos bélicos mundiales (1914-1918; 1939-1945). Época donde el problema de producción y abastecimiento de alimentos para la población creciente, generó el desarrollo de variedades de cereales de alto rendimiento. El aumento de la producción agrícola derivó en lo que se conoce como la revolución verde, término utilizado en 1968 por la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional-USAID (Sarandón & Flores, 2014).

La revolución verde introdujo un cambio en la agricultura que fue entendido como un proceso de modernización, donde la evolución tecnológica sustituyó el conocimiento de los agricultores, compilado a partir de la experiencia y la práctica. La evolución tecnológica puso a disposición maquinaria e insumos que incrementaron la productividad, al introducir variedades y semillas de alto rendimiento por unidad de área condicionadas al uso intensivo de fertilizantes, agroquímicos, combustible y sistemas de riego. Además de suplantar un gran número de variedades adaptadas a las condiciones locales, por pocas variedades creadas para aumentar el rendimiento de los cultivos (Ceccon, 2008).

La agricultura como una práctica acorde con el uso racional de los recursos naturales cambió al inicio de la “revolución verde”. Si bien resolvió en el momento el problema de producción de alimentos para una población creciente, también generó posteriormente problemáticas sociales, económicas y ecológicas que limitaron finalmente su propia capacidad productiva. Se derivaron externalidades negativas como el desarrollo de resistencia de plagas, erosión de suelos, pérdida de nutrientes, pérdida de materia orgánica, pérdida de la estructura del suelo, eutrofización de cuerpos de agua, reducción de la oferta hídrica en acuíferos, disminución de la eficiencia energética, pérdida de biodiversidad, erosión cultural, exclusión de agricultores de bajos recursos y susceptibilidad de los cultivos a eventos climáticos extremos. Factores que condicionaron y siguen condicionando la sostenibilidad de los sistemas agrícolas modernos (Sarandón & Flores, 2014).

Pese a las externalidades negativas, la sociedad espera de los sistemas agrícolas modernos la maximización del rendimiento en términos de productividad por unidad de área. Al respecto Shiva (1994) plantea que, en términos de productividad los sistemas agrícolas dependientes de variedades mejoradas e insumos externos pueden ser superiores a los sistemas agrícolas que implementan variedades locales. Sin embargo, considera que la comparación de productividad entre los dos modelos debe hacerse a nivel de sistema, donde las relaciones entre plantas, suelo, agua y diversidad establecen una diferencia significativa.

En el proceso de cambio del paradigma, de un modelo de maximización del rendimiento a un modelo de rendimientos sostenibles y mínima dependencia de insumos externos, es necesario que los modelos agrícolas adopten características que les permitan mantener en el tiempo los niveles de productividad, ser rentables económicamente, justos en términos culturales y sociales, y conservar el capital ambiental del cual dependen a nivel local, regional y global. Para el logro de estas condiciones se plantea el concepto de agricultura sustentable, el cual incluye el cumplimiento simultáneo de objetivos productivos, ecológicos, económicos y socioculturales (Sarandón & Flores, 2014). Con respecto a lo anterior, Sarandón (2010) citado por Sarandón y Flores (2014) definió la agricultura sustentable como:

A aquella que mantiene en el tiempo un flujo de bienes y servicios que satisfagan las necesidades alimenticias, socioeconómicas y culturales de la población, dentro de los límites biofísicos que establece el correcto funcionamiento de los sistemas naturales (agroecosistemas) que lo soportan (Sarandón & Flores, 2014, p. 52).

En el concepto de “agricultura sustentable” los agroecosistemas son un tipo de ecosistema que cuenta con capital natural (suelo, biodiversidad, energía, agua) y capital sociocultural (conocimientos, creencias, valores, tradiciones, formas de producción) (Sarandón & Flores, 2014), donde las interrelaciones entre las dimensiones ecológica, tecnológica y socioeconómica son consideradas en conjunto para generar bienes y servicios (Hernández et al., 1977). Bajo la premisa de analizar las interrelaciones a nivel local para una producción agrícola sustentable, surge la agroecología, la cual incluye las ciencias sociales y humanísticas, así como las ciencias ecológicas y agrícolas, la inclusión de diferentes disciplinas alimenta el debate de la teoría y práctica de la agroecología.

El término "agroecología" fue utilizado por primera vez según Wezel y Soldat (2009) en dos publicaciones científicas del agrónomo ruso Basil Bensin en 1930, como respuesta al uso de insumos químicos para aumentar el rendimiento de los cultivos. Wezel y Soldat (2009) sugieren el concepto de "agroecología" como el término que describe el uso de métodos ecológicos en la investigación sobre cultivos comerciales. Por otra parte, Bensin (1930) citado por Gliessman (2013, p. 20) planteó que la investigación agroecológica debía involucrar la botánica, la meteorología, la climatología, la edafología y la agronomía experimental. Además, sugirió que la agronomía debía centrarse en la investigación de las razones de la producción agrícola obtenida y no en los rendimientos derivados del uso de nuevos insumos y prácticas.

En el periodo de 1930 a 1960 la agroecología fue definida como la aplicación de las ciencias biológicas, especialmente de la ecología en la agricultura. Azzi (1956) citado por Gliessman (2013, p. 20) propuso la “ecología agrícola”, la cual analizaba las características ecológicas de las especies cultivadas y las relaciones entre plantas, medioambiente y producción. Tischler (1965) citado por Gliessman (2013, p. 21) presenta en sus publicaciones una orientación que requiere analizar la ecología de los componentes del sistema agrícola y sus interacciones incluyendo cultivos, manejo de plagas y métodos de labranza. Tischler (1965) fue uno de los primeros autores en plantear la visión de sistemas agrícolas como ecosistemas con énfasis en los cultivos, sin incluir el componente social y cultural.

Janzen (1973) citado por Gliessman (2013, p. 21) planteó una visión ecológica en el manejo de agroecosistemas tropicales, al incluir la protección de los bosques en los sistemas productivos, además de integrar el conocimiento de la ecología local, las especies y la cultura, para satisfacer las necesidades de la población. Posteriormente Loucks (1977) citado por Gliessman (2013, p. 21) incluyó a la perspectiva de ecosistema, la necesidad de determinar la estabilidad a largo plazo y el impacto de los agroecosistemas más allá del nivel local.

Desde la década de 1970 la agroecología continuó su fortalecimiento como una disciplina científica, también surgió gradualmente su definición como movimiento social y como un conjunto de prácticas. En este período (1970-1980) la agroecología se caracterizó por un creciente interés en aplicar la visión ecológica a la agricultura y en la investigación sobre los sistemas agrícolas tradicionales, tropicales y subtropicales de los países en desarrollo (Gliessman, 2013).

En la década de 1980 la agroecología surgió como un marco conceptual distinto, con propuestas en cuanto a métodos holísticos para el estudio de los agroecosistemas. La agroecología se definió como el desarrollo y aplicación de la teoría ecológica para el manejo de los sistemas agrícolas de acuerdo con la disponibilidad de recursos y como una forma de proteger los recursos naturales con directrices para diseñar y manejar agroecosistemas sostenibles (Altieri, 1989).

Según Gliessman (2013) las agriculturas alternativas como la agricultura ecológica, surgen como respuesta a la degradación ambiental y la crisis socioeconómica consecuencia del modelo de agricultura industrializada basada en la maximización de la productividad, con efectos negativos en las sociedades humanas como en los recursos naturales. Estos efectos, originaron la conformación de organizaciones que orientaron su producción agrícola hacia las prácticas campesinas y/o a los conceptos y métodos de la ecología que en la década de 1970 a 1980 cobran gran importancia desde la academia (Gliessman, 2013).

Estos tipos de agricultura tomaron diferentes denominaciones como agricultura biológica, agricultura orgánica y agricultura ecológica y se fundamentan en la eliminación total o parcial de insumos agroquímicos (Gliessman, 2013). A finales de los años 90's la agroecología fue definida por Gliessman et al. (1998) como la aplicación de conceptos y principios ecológicos para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles. Este concepto desarrolló formas para incrementar la productividad y la sostenibilidad de la agricultura, promoviendo una relación armónica con el medio ambiente y el mejoramiento de la calidad de vida. En el concepto planteado por Gliessman et al. (1998) no se evidencian las relaciones del agroecosistema con la economía, la cultura y la sociedad.

Casi en el mismo período comenzó a consolidarse el uso del término agroecología asociado con un conjunto de prácticas agrícolas que tienen por objeto el desarrollo de una forma de interacción más "respetuosa con el medio ambiente" o la generación de una agricultura "sostenible". En América Latina, ecólogos, agrónomos y etnobotánicos, especialmente en México y América Central, apoyaron agricultores locales a mejorar sus prácticas agrícolas. Por ejemplo, la conservación de los recursos naturales, el apropiado manejo de la fertilidad del suelo y la conservación de la agrobiodiversidad (Gliessman et al., 2007). Existen diferentes movimientos sociales que comparten este punto de vista y que, en muchos casos, utilizan el término agroecología para asociarlos a sus prácticas.

La agroecología como una disciplina científica presentó un fuerte cambio en la década del 2000, en el libro titulado agroecología: "Teoría y práctica para una agricultura sustentable", Altieri y Nicholls (2000) definen la agroecología como la disciplina científica que enfoca el estudio de la agricultura desde una perspectiva ecológica, consideran los ecosistemas agrícolas como las unidades de estudio, y dentro de estos sistemas se investigan y analizan los ciclos minerales, las transformaciones de energía, los procesos biológicos y las relaciones socioeconómicas como un todo.

Desde la perspectiva científica, la agroecología busca la optimización del agroecosistema, analizando las interacciones complejas entre sus componentes agrícolas, tecnológicos, biofísicos y sociales. Asimismo, establece las bases para la conservación de la biodiversidad para lograr una producción sustentable, la cual provee a los agroecosistemas de procesos y servicios. La agroecología permite analizar unidades mayores al cultivo y procesos de mayor complejidad, permite la integración de diversas disciplinas y el agroecosistema con sus componentes socioculturales, económicos, técnicos y ecológicos (Altieri & Nicholls, 2000).

Posteriormente, Altieri (2002) sigue aportando a la definición de agroecología, al plantearla como la ciencia que aplica criterios y principios ecológicos para diseñar agroecosistemas sostenibles, con mínima dependencia de subsidios energéticos, al buscar que las interacciones ecológicas y los sinergismos entre los componentes biológicos subsidien la fertilidad, la productividad y la protección de los cultivos, de manera que conserven los recursos naturales, sean culturalmente sensibles, social y económicamente viables. Altieri (2002) refiere a la agroecología como el estudio

holístico de los agroecosistemas incluyendo elementos ambientales y humanos, con énfasis en la forma, dinámica y función de sus interrelaciones y procesos.

De igual modo Sarandón (2002) define la agroecología como:

Un nuevo campo de conocimientos, una disciplina científica que reúne, sintetiza y aplica conocimientos de la agronomía, la ecología, la sociología, la etnobotánica y otras ciencias afines, con una óptica holística y sistemática y un fuerte componente ético, para generar conocimientos, validar y aplicar estrategias adecuadas para diseñar, manejar y evaluar agroecosistemas sustentables (Sarandón, 2002, p. 55).

Otros conceptos pasan de las escalas de campo o agroecosistema hacia una perspectiva más amplia sobre el sistema alimentario total que se define como una red global de producción, distribución y consumo. En esta perspectiva, los productores y los consumidores se ven como partes conectadas activamente del sistema. Condición que implica que la agroecología debe considerar el estudio integral de la ecología de todo el sistema alimentario que abarca las dimensiones ecológicas, económicas y sociales. Esta definición conducirá a un enfoque práctico y orientado a la acción que fomenta la integridad, la conectividad de los sistemas y estimulará una orientación a la singularidad de cada lugar, además de generar soluciones adecuadas a sus recursos y limitaciones. La definición amplía nuestro pensamiento más allá de las prácticas de producción y los efectos ambientales inmediatos en el campo o la finca (Gliessman et al., 2007). De igual manera, la agroecología busca la transformación de los sistemas alimentarios para lograr su sostenibilidad, bajo lineamientos de responsabilidad ecológica, viabilidad económica y equidad social (Gliessman et al., 2007).

En la última década, se define la agroecología como: "La ciencia que estudia la estructura y función de los agroecosistemas tanto desde el punto de vista de sus relaciones ecológicas como culturales" (León, 2009, p. 41). La agroecología ha incorporado el estudio de componentes socioculturales, económicos, políticos e institucionales que influencian sobre los campos de cultivo, con una intensidad que puede llegar a ser igual o mayor a las influencias ecológicas. Según Wezel y Soldat (2009) citado por Méndez, Bacon y Cohen (2013, p. 10) los conceptos de agroecología generados a lo largo del tiempo definen la agroecología como una ciencia y como una práctica. Otros autores la definen además como un movimiento social.

Los conceptos de agroecología son usados según condiciones locales, científicas, sociales y de las características del entorno (Méndez et al., 2013). Más aún, según Wezel y Soldat (2009) citado por Méndez (2013, p. 11) se identifican dos perspectivas para el concepto de agroecología: la primera interpreta la agroecología como un medio para generar investigación científica desde las interacciones tróficas y la biología, el análisis de procesos ecológicos y agrícolas, generando principalmente resultados en procesos ecológicos y agronómicos y buscando un manejo agrícola basado en la ecología. Esta perspectiva ha generado avances y conocimientos en aspectos de la producción agrícola. Sin embargo, aparta la dimensión social y cultural de la agricultura y los conocimientos generados a partir de las tradiciones productivas de las comunidades agrícolas.

Una segunda perspectiva planteada por Méndez et al. (2013) integra los aspectos sociales y culturales abarcando todo el sistema agroalimentario, caracterizándose por la generación de conocimiento a través de la investigación transdisciplinaria, en la que aportan las disciplinas científicas y/o académicas, la participación de comunidades agrícolas, el diálogo de saberes y el conocimiento empírico local, para redirigir el desarrollo de los sistemas agroalimentarios hacia la sostenibilidad.

La investigación desde el enfoque transdisciplinar ha sido desarrollada por académicos influyentes de la agroecología como Gliessman et al. (2007); Altieri y Toledo (2011); Perfecto, Vandemeer y Wright (2009) y Sevilla (2006) citado por Méndez et al. (2013, p. 12). Ruiz-Rosado (2006) citado por Gómez, Ríos-Osorio y Eschenhagen (2015, p. 681) define lo transdisciplinar como una investigación en la que los problemas objeto de estudio son definidos sin enmarcarlos en una disciplina específica, igualmente busca las soluciones sin depender de una disciplina específica. El problema y no las disciplinas es lo que define la investigación. Lo transdisciplinar involucra distintos tipos de conocimientos, tanto científicos, académicos, como empíricos, locales o indígenas, orientado a resolver problemas.

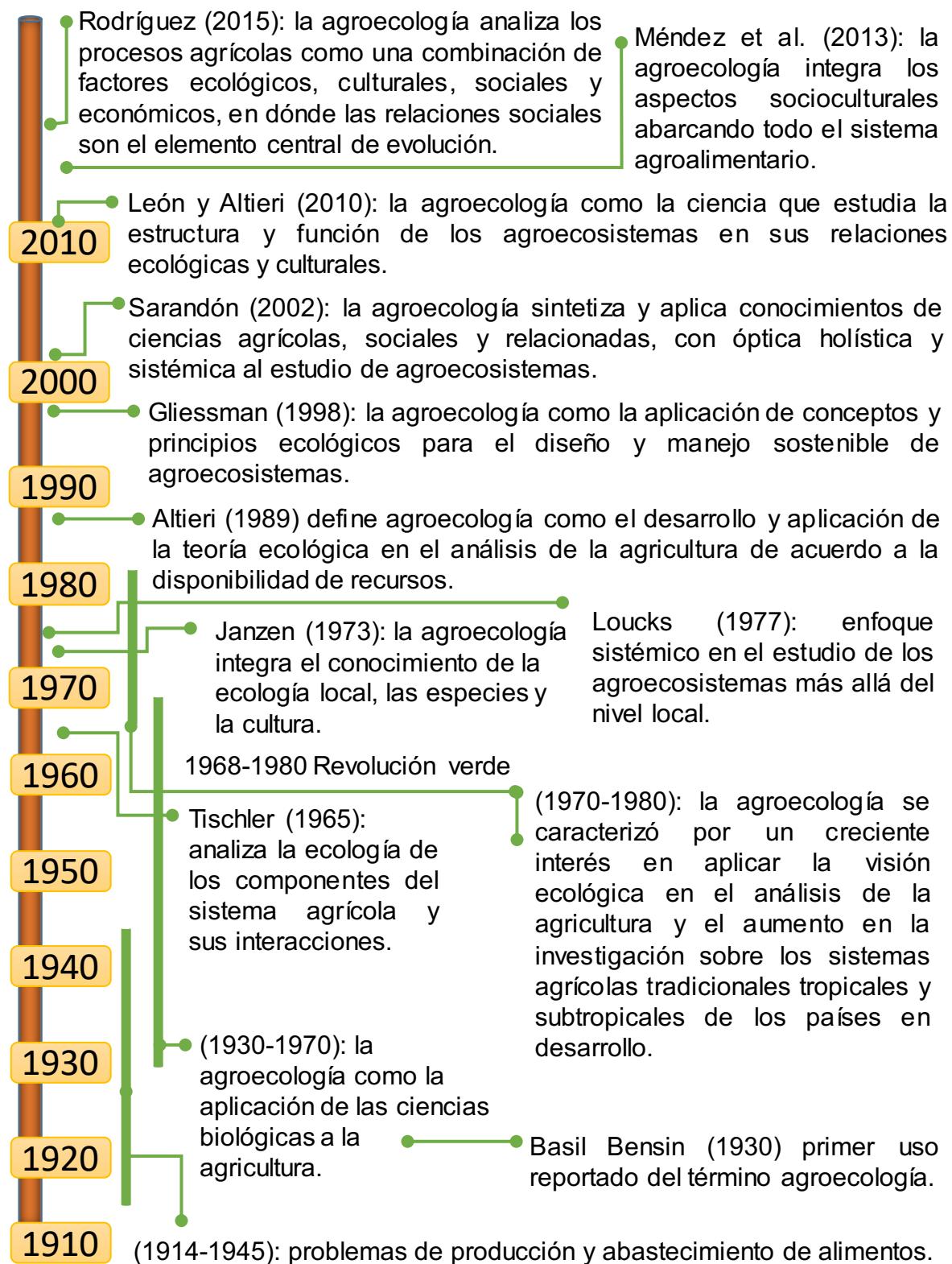
La agroecología como transdisciplina integra ciencias agrícolas, ecología, sociología, antropología, geografía, estudios campesinos, desarrollo rural, economía ecológica y ecología política (García, 2000) citado por Castillo (2011, p. 29). La agroecología es entonces una visión de la agricultura desde una perspectiva holística, sistemática y antrópica, abordada por la integración de ciencias naturales y sociales que aportan al conocimiento y desarrollo de tecnologías agrícolas con una visión ecológica y humana (Castillo, 2011). A manera de síntesis Gliessman (2013) propone que “*La agroecología es la ecología del sistema alimentario*”. Adicionalmente, Méndez et al. (2013) refuerzan el concepto de agroecología como una ciencia transdisciplinar, proponiendo que debe estar orientada a la acción, con enfoque participativo para la transformación del sistema agroalimentario total.

Considerando que la agroecología se originó a partir de la oposición a los primeros procesos de industrialización agrícola como consecuencia del pensamiento social agrario, debe ser definida dentro de un contexto social. De no ser así se limitaría el alcance de su objetivo de redirigir el desarrollo el sistema agroalimentario (producción, distribución y consumo) hacia la sostenibilidad. La agroecología busca crear estrategias para cambiar los modos de producción y consumo humano, insertando en estas estrategias la dimensión local y su potencial de conocimiento, la diversidad cultural y la diversidad ecológica (Guzmán & Woodgate, 2013). Más aún, la agroecología trasciende la práctica agrícola, al analizar los procesos agrícolas como una combinación de factores ecológicos y socioeconómicos, donde las relaciones sociales son el elemento central de evolución (Rodríguez, 2015).

Los cambios en el concepto y visiones de la agroecología se pueden observar mediante la línea de tiempo presentada en la figura 1-1. En la cual se observa cómo entre 1930 y 1980 la evolución fue mucho más lenta que entre 1990 y 2015. Condición derivada, por una parte, de la crisis ecológica y de seguridad alimentaria que no pudo resolver la revolución verde y, por otra parte, del reconocimiento de las relaciones entre los sistemas naturales y sociales. La aceptación de las limitaciones del abordaje de la complejidad del agroecosistema desde la ecología o la biología, derivan en el enfoque transdisciplinar, como uno de los grandes avances en las últimas décadas.

En síntesis, la agroecología, ya sea como ciencia, práctica o movimiento social, no puede desligar su estudio de las relaciones entre los sistemas sociales y los sistemas ecológicos. Las necesidades de una humanidad sumida en la hambruna y la crisis, como consecuencias de las guerras mundiales, demandaron la aplicación de la biología y la ecología a la agricultura. Estos aportes no fueron suficientes, por lo cual la revolución verde desde los 60's hasta finales de los 80's planteó soluciones de base tecnológica y técnica, alejándose de los principios ecológicos de una agricultura condicionada a las restricciones biofísicas de un lugar, mediante el uso de insumos externos de energía, la mecanización y la reducción de biodiversidad. Reduciendo la sostenibilidad de la agricultura por mayores rendimientos de producción.

Figura 1-1. Línea de tiempo en la evolución del concepto de agroecología



Fuente: autor (2018)

Hasta la década del 90 la agroecología tuvo una continua evolución, manteniéndose en conflicto con el sistema agrícola tecnificado, planteando nuevas formas de investigación científica desde un enfoque sistémico, rescatando los sistemas agrícolas tradicionales, haciendo evidentes los efectos de la degradación de los ecosistemas y la pérdida de servicios ecosistémicos. A finales de la década del 90, el concepto de agroecología reafirma la necesidad de ligar los aspectos ecológicos, económicos y políticos con la dimensión social incorporando la necesidad de definir y diseñar agroecosistemas sostenibles.

Los agroecosistemas desde la ciencia agroecológica son un esfuerzo diseñado, continuo y metódico para que los sistemas agrícolas imiten a los ecosistemas naturales que enmarcan, condicionan y promueven la producción de alimentos, a través de las funciones percibidas como servicios ecosistémicos. Los agroecosistemas pueden considerarse como uno de los problemas de investigación de la agroecología, ya que su estudio requiere un enfoque transdisciplinar y participativo, y su definición, manejo y gestión debe orientarse desde las decisiones sociales, las cuales están influenciadas por los contextos culturales, económicos, políticos y biofísicos.

1.1.1.1 Agroecosistema

Conceptualmente es relevante iniciar la discusión partiendo del ecosistema. Márquez (2002) lo define como las interacciones entre los seres vivos y su entorno, mediante intercambios de materia y energía a través de los ciclos biogeoquímicos. Por otra parte, Gliessman (2002) define al ecosistema como un sistema funcional de relaciones complementarias entre el ambiente y los organismos vivos. Gliessman (2002) plantea que un ecosistema cuenta con partes físicas que conforman su estructura y procesos dinámicos que se constituyen en las funciones del ecosistema.

Los ecosistemas pueden analizarse en términos de la composición jerárquica de sus partes, donde el primer nivel, y el más simple, es el individuo, el segundo nivel lo constituyen los grupos de individuos de la misma especie o poblaciones, el tercer nivel lo forman las comunidades o conjunto de varias especies, coexistiendo e interactuando en un lugar específico donde la interacción entre organismos afecta su abundancia y distribución. El cuarto nivel, el más global, lo constituye el ecosistema, el cual incluye la totalidad de factores abióticos y las comunidades de un área específica. Los ecosistemas se caracterizan por sus propiedades emergentes, resultado de la interacción de las partes en cada nivel de organización (Gliessman, 2002).

En los ecosistemas las comunidades, autótrofas y heterótrofas, cuentan con la habilidad de resistir cambios y regresar a su estado original cuando son perturbadas, propiedad inherente de los ecosistemas y que se conoce como estabilidad que, combinada con los cambios dinámicos ocasionados por las perturbaciones, se denomina equilibrio dinámico. Al respecto, en un ecosistema se desarrollan dos procesos dinámicos fundamentales, el primero es el flujo de energía entre las partes, y el segundo son los ciclos de nutrientes e interacciones de organismos y materiales del sistema (Gliessman, 2002).

En el marco del concepto de ecosistema, Hernández, García y Díaz (1977) proponen que los sistemas agrícolas son un tipo de ecosistema, denominado agroecosistema, donde las interrelaciones entre la ecología, la economía, los factores tecnológicos y socioeconómicos son analizadas en conjunto para generar bienes y servicios. Más aún, los sistemas agrícolas modifican a los sistemas naturales (ecosistemas) con el objetivo de producir bienes demandados por el sistema alimentario, sustituyendo parcial o totalmente los bienes y servicios que estos ecosistemas generaría naturalmente sin la intervención humana (Sarandón & Flores, 2014). En éste mismo sentido, Sarandón y Flores (2014) sostienen que los agroecosistemas son ecosistemas

modificados que pueden ser definidos como sistemas ecológicos asociados a variables socioeconómicas, cuyo objetivo es la producción de bienes y servicios.

Spedding (1982) y Wadsworth (1997) citados por Barrezueta (2015, p. 21) sostienen que un sistema agrícola puede ser clasificado como un sistema ecológico, ya que incluye un sistema vivo, donde la unidad de producción (la finca) puede ser vista de manera equivalente a una unidad ecosistémica en ecología. En este caso, el sistema agrícola se denomina agroecosistema, siendo un conjunto de plantas, animales, microorganismos que pueden incluir cultivos, animales domésticos o una combinación de cultivos y animales que interactúan entre sí y con el ambiente. Más aún, Salas, Labrador y Altieri (2001) citados por Sánchez y Muñoz (2016, p.13) definen los agroecosistemas como “cualquier tipo de ecosistema modificado y gestionado por los seres humanos con el objetivo de obtener alimentos, fibras y otros materiales de origen biótico”.

Al ser el agroecosistema un ecosistema modificado, es comparable entonces en sus partes estructurales y funcionales con los ecosistemas. Gliessman (2002) define el agroecosistema como un sitio de producción agrícola visto como un ecosistema, lo cual permite analizar los sistemas de producción de alimentos en su totalidad, incluyendo entradas y salidas e interacciones entre sus partes.

Gliessman et al. (1998) sugirió que cuanto mayor es la semejanza estructural y funcional de un agroecosistema con los ecosistemas de la región biogeográfica donde se desarrolla, mayor es la probabilidad de que el agroecosistema sea sostenible. Por tanto, el agroecosistema debe imitar la estructura y funciones de los ecosistemas locales en los que se desarrolla, constituyéndose en un sistema **con alta variedad de especies que promueva el control natural de plagas, el reciclaje de nutrientes, un suelo biológicamente activo y una cobertura vegetal que minimice pérdidas edáficas** (Altieri, 2002). Adicionalmente, en el agroecosistema los procesos ecológicos e interrelaciones entre sus poblaciones y comunidades, pueden ser analizados y manejados para mejorar la producción de manera sostenible, con menores efectos negativos ambientales y sociales y un menor uso de insumos externos.

Con el objeto de propender por la sostenibilidad de los agroecosistemas, Sarandón y Flores (2014) consideran como indispensable analizarlos desde una visión sistémica, donde los sistemas agrícolas se visualicen como ecosistemas asociados a variables socioeconómicas para la producción de bienes y servicios. Sumado a lo anterior, para que los agroecosistemas sean sostenibles, se deben tener en cuenta una amplia serie de factores y procesos ecológicos, económicos y sociales que interactúan entre sí. No obstante, la sostenibilidad ecológica es la materia prima de construcción sobre la cual los otros elementos de la sostenibilidad dependen (Gliessman et al., 1998)

Gliessman (2002) identifica características que son diferentes entre un ecosistema y un agroecosistema. Éstas se asocian a la productividad, interacciones, diversidad, heterogeneidad, entre otras, las cuales tienen niveles distintos en un ecosistema que en un agroecosistema. Frente al ecosistema, los agroecosistemas, si bien tienen una alta productividad, su nivel de interacción, diversidad, heterogeneidad de especies y estabilidad son bajos, y su permanencia en el tiempo es corta comparada con los ecosistemas. Las diferencias entre ecosistemas naturales y agroecosistemas son ilustradas en la figura 1-2.

Sin embargo, pese a las diferencias entre ecosistemas y agroecosistemas derivadas de la influencia humana, un agroecosistema puede ser diseñado de manera similar a los ecosistemas naturales con la aplicación de conceptos ecológicos, en términos de aumento en la diversidad de

especies, mejoramiento del ciclo de nutrientes y promoviendo la heterogeneidad en el hábitat (Gliessman, 2002).

Figura 1-2. Diferencias entre ecosistemas naturales y agroecosistemas

Características	Ecosistema natural	Agroecosistema
Productividad neta	Media	Alta
Interacciones tróficas	Compleja	Simple, linear
Diversidad de especies	Alta	Baja
Diversidad genética	Alta	Baja
Ciclo de nutrientes	Cerrado	Abierto
Estabilidad (capacidad de recuperación o resiliencia)	Alta	Baja
Control humano	Independiente	Dependiente
Permanencia temporal	Larga	Corta
Heterogeneidad del hábitat	Complejo	Simple

Fuente: Gliessman (2002)

Si bien el agroecosistema ha sido visto como un tipo de ecosistema alterado y adaptado a las consideraciones humanas, existen otras definiciones que amplían esta visión. Tal es el caso de la definición dada desde la complejidad y el valor potencial de los sistemas indígenas, en la cual se definen los agroecosistemas como la interacción entre los factores ecológicos, tecnológicos y socioeconómicos (Hernández et al., 1977). Este autor propone que los sistemas agrícolas modernos han perdido su fundamento ecológico, ya que los factores socioeconómicos se convirtieron en las fuerzas motrices dominantes en el sistema alimentario.

Desde el punto de vista de Altieri y Nicholls (2000) se considera a los agroecosistemas como aquellos sistemas en los cuales los ciclos minerales, las transformaciones de la energía, los procesos biológicos y las relaciones socioeconómicas son investigados y analizados como un todo. De este modo, a la investigación agroecológica le interesa no sólo la maximización de la producción de un componente particular del agroecosistema sino la optimización de los agroecosistemas en su totalidad. El énfasis en la investigación agrícola se dirige más allá de las consideraciones disciplinarias hacia interacciones complejas entre personas, culturas, cultivos, suelo y animales. A este respecto, la agroecología plantea una mirada distinta sobre el agroecosistema, generando nuevas hipótesis y teorías sobre su comportamiento, avanzando de las consideraciones biofísicas y ecosistémicas, hacia una visión del agroecosistema como escenario donde se gestan cambios políticos, culturales, sociales y económicos (León, 2009).

En la última década, el concepto de agroecosistema se aborda como un sistema socioecológico, lo cual en esencia plantea que son ecosistemas productivos de origen humano (MADS, 2012)

citado por Caro-Caro y Torres-Mora (2015, p. 244). Un sistema socioecológico se define como un sistema ecológico estrechamente vinculado a uno o varios sistemas sociales, de carácter complejo y sujeto a variaciones espacio temporales, donde las diferencias de percepción de los actores inciden en la toma de decisiones (Anderies, Janssen & Ostrom, 2004). Caro-Caro y Torres-Mora (2015, p. 244) definen los agroecosistemas como un sistema con potencial de diversificación de la producción, ampliación de la diversidad biológica y donde se llevan a cabo procesos de complementariedad y sinergismo con los sistemas naturales, incorporando intereses y percepciones de actores sociales.

León (2009) hace énfasis en las relaciones o interacciones que se dan entre el mundo cultural y el mundo ecosistémico dentro del agroecosistema, definiendo entonces el agroecosistema como:

El conjunto de relaciones e interacciones que suceden entre suelos, climas, plantas cultivadas, organismos de distintos niveles tróficos, plantas adventicias y grupos humanos en determinados espacios geográficos, cuando son enfocadas desde el punto de vista de sus flujos energéticos y de información, de sus ciclos materiales y de sus relaciones simbólicas, sociales, económicas, militares y políticas, que se expresan en distintas formas tecnológicas de manejo dentro de contextos culturales específicos (León, 2009, p. 50).

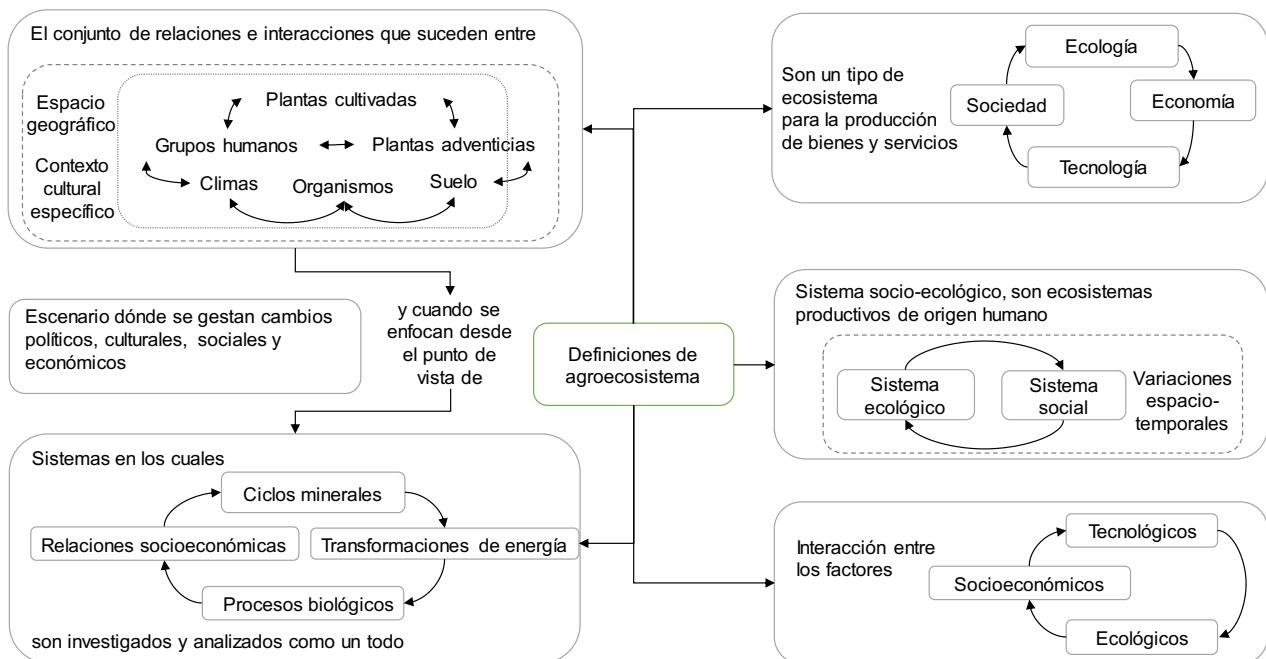
Por otro lado, para la delimitación de los agroecosistemas, León (2014) especifica que la clasificación de los agroecosistemas debe realizarse basado en características como actividad, cultivo principal, usos, tenencia de la tierra, superficie, intensidad de uso, relaciones económicas y grupos humanos involucrados. Para León (2014) los agroecosistemas se dividen en dos categorías: agroecosistemas mayores y agroecosistemas menores, definiendo el agroecosistema mayor como:

A diferencia de un cuerpo sólido y único unido por piezas conectadas físicamente y que expresa propiedades autónomas de origen, movimiento, reproducción y muerte, el agroecosistema mayor puede entenderse como un cuerpo unido por interrelaciones, muchas de ellas intangibles (poder, autoridad, decisión) y muchas de ellas físicas, químicas y biológicas que le comunican un cierto orden, una dirección, un destino que genera a la vez dinámicas constantes de cambio y movimiento, en que él mismo se reproduce y a partir de las cuales se desequilibra y, en ocasiones desaparece (León, 2014, p. 329).

El agroecosistema mayor es una unidad de análisis caracterizada por su permanencia en el tiempo y el espacio, a diferencia de los agroecosistemas menores con mayor susceptibilidad a los cambios y modificaciones (León, 2014). Se entendería entonces el agroecosistema mayor a nivel de finca, parcela y/o granja y el agroecosistema menor como sus componentes (cultivos, pastos o sitios forestales) (León, 2014).

Existen entonces, múltiples definiciones de agroecosistema que van desde el espacio donde se desarrollan interacciones biofísicas hasta donde se incuban y germinan cambios sociopolíticos, culturales y económicos. Las visiones asociadas al concepto de agroecosistema son sintetizadas en la figura 1-3.

Figura 1-3. Conceptos asociados al agroecosistema



Fuente: autor (2018) basado en Hernández (1997); Altieri y Nicholls (2000); Gliessman (2002); León (2009); Sarandón y Flores (2014); Barrezueta (2015).

En estos conceptos, en primer lugar, se considera como el conjunto de relaciones e interacciones que suceden entre las plantas, la comunidad, los componentes bioclimáticos y biofísicos en un contexto cultural y geográfico específicos que, desde una visión sistémica, se estudian como un todo, los ciclos minerales, las relaciones socioeconómicas, las transformaciones de energía y los procesos biológicos. La incorporación de la visión sistémica permite estudiar al agroecosistema en su complejidad e integralidad, asumiendo la incertidumbre sobre los comportamientos emergentes y las sinergias que pueden resultar de la interacción entre sus diferentes componentes. En el estudio de las relaciones es importante resaltar las limitaciones impuestas por los ecosistemas y las condiciones biogeográficas en las cuales el agroecosistema se encuentra inmerso.

En segundo lugar, un agroecosistema es un tipo de ecosistema adaptado para producir aquellos bienes y servicios que una sociedad decide que son necesarios para su bienestar y satisfacción, donde tienen lugar las interacciones entre el sistema ecológico con el sistema sociocultural, la economía, la tecnología y la política. En esta definición es donde surge el planteamiento del agroecosistema como espacio promotor de cambios, tanto de significados asociados a una visión consumista, a una visión de satisfacción del ser y bien común, como cambios en la percepción sociocultural de los agroecosistemas y los servicios ecosistémicos que estos pueden proveer.

• Estructura, componentes y procesos de los Agroecosistemas

El estudio de los agroecosistemas es a menudo más difícil que el estudio de los ecosistemas, debido a que la intervención humana altera la estructura y función de éstos últimos (Gliessman et al., 1998). Otro aspecto que dificulta su estudio es que los agroecosistemas no presentan límites claros, ya que no se restringen a un cultivo o una finca, sus límites físicos, biológicos, sociales, económicos, políticos son difusos (León, 2009). Más aún, en muchos casos los límites son designados arbitrariamente. Generalmente son equivalentes a la unidad de producción (granja,

finca, parcela, etc.) y dependerán del interés y de los objetivos en su análisis (Gliessman, 2002). Aumentando la complejidad del análisis, los agroecosistemas están mediados por decisiones humanas, tanto del agricultor como de actores externos, instituciones, mercado, políticas, tecnologías, consumidores a distintos niveles, tanto locales como globales (León, 2009).

Como una aproximación a la comprensión de los agroecosistemas, se define su estructura como la configuración o arreglo espacial interno del agroecosistema mayor y la conectividad entre sus distintos sectores y corredores de vegetación o sistemas productivos que permite el movimiento y el intercambio de distintas especies animales y vegetales, les ofrece refugio, hábitat y alimento, provee regulaciones funcionales de distinto orden e incide en la producción, conservación de bienes naturales y en otros aspectos ecosistémicos y culturales (León, 2014). Por otro lado, Gliessman (2002) establece que la estructura de los agroecosistemas se constituye por los subsistemas que lo conforman y sus interrelaciones. Estos subsistemas son: agrícola (especies y coberturas cultivadas), pecuario (componentes productivos que están relacionados con la cría o engorde de animales), forestal (coberturas naturales y su biodiversidad) e hídrico (cuerpos de agua lenticos y loticos).

En el estudio de los agroecosistemas, complementario a la definición de su estructura, es relevante analizar los componentes del mismo. Por una parte, aquellos ingresados por el ser humano, definidos como insumos antropocéntricos (maquinaria, fertilizantes, semillas, agua de irrigación, trabajo), por otra parte, los insumos externos naturales (radiación solar, lluvia, viento, sedimentos, nutrientes y energía) (Gliessman, 2002). Los componentes permiten establecer el nivel de dependencia de los insumos antropocéntricos, las pérdidas de masa y energía, y las relaciones que pueden existir entre los insumos aportados por el ser humano, los animales y productos de origen natural, el consumo, mercados y los procesos internos que pueden darse en el cultivo.

Según Gliessman (2002) los principales procesos en el agroecosistema y sus diferencias con el ecosistema son:

- Flujo de energía: en un agroecosistema el flujo de energía es alterado significativamente por la interferencia humana. Las entradas provienen de fuentes elaboradas por el ser humano convirtiendo a los agroecosistemas en sistemas abiertos, debido a la energía que sale en cada cosecha en lugar de almacenarse en forma de biomasa y quedarse en el sistema.
- Ciclo de nutrientes: el ciclo de nutrientes en un agroecosistema se caracteriza por un reciclaje mínimo, ya que una cantidad de nutrientes abandona el sistema con la cosecha y otros fenómenos como la lixiviación y la erosión, debido a la falta de cobertura permanente en el suelo. Nuevamente los nutrientes perdidos son reemplazados con fertilizantes.
- Mecanismos de regulación de poblaciones: en un agroecosistema las poblaciones son reguladas por el ser humano en forma de semillas o por medio de agentes de control de poblaciones. La diversidad biológica se reduce y el potencial de incremento de poblaciones de plagas está siempre presente a pesar de los controles humanos.

• Macroaspectos de sostenibilidad de los agroecosistemas

El diseño de un agroecosistema sostenible busca que obtenga las características de un ecosistema natural manteniendo una cosecha deseable. En este contexto, las características

serán, primero que el flujo de energía se diseñe para depender menos de insumos no renovables aportados por el ser humano, para crear un balance entre la energía que fluye dentro del agroecosistema y la energía que lo abandona (principalmente en forma de cosecha). Una segunda característica será la definición de los mecanismos de regulación de poblaciones, el cual tendrá mayor éxito al incrementar el número de hábitats y una mayor diversidad en el sistema. Como tercera característica se tiene el incorporar atributos como productividad, estabilidad, viabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autosuficiencia, con el fin de proporcionar al agroecosistema las condiciones para lograr un equilibrio dinámico y configurar así un sistema sostenible (Gliessman, 2002).

El diseño de agroecosistemas sostenibles es fundamental para generar las condiciones ecológicas y sociales necesarias para que los SE puedan promoverse. En el diseño de agroecosistemas sostenibles, la agroecología surge como ciencia que permite aplicar conceptos y lineamientos ecológicos en la complejidad de los agroecosistemas, más allá de aplicar prácticas alternativas, al desarrollar agroecosistemas con una dependencia mínima de agroquímicos y subsidios de energía, enfatizando en sistemas agrícolas complejos en los cuales las interacciones ecológicas y los sinergismos entre sus componentes biológicos, proveen los mecanismos para que los sistemas subsidien la fertilidad de su propio suelo, la productividad y la protección de los cultivos (Altieri, 2002).

Según Reijntjes, Haverkort y Waters (1992); Pret (1994) y Vandermeer (1995) citados por Altieri (2002, p. 32), para diseñar agroecosistemas sostenibles se deben aplicar los siguientes lineamientos:

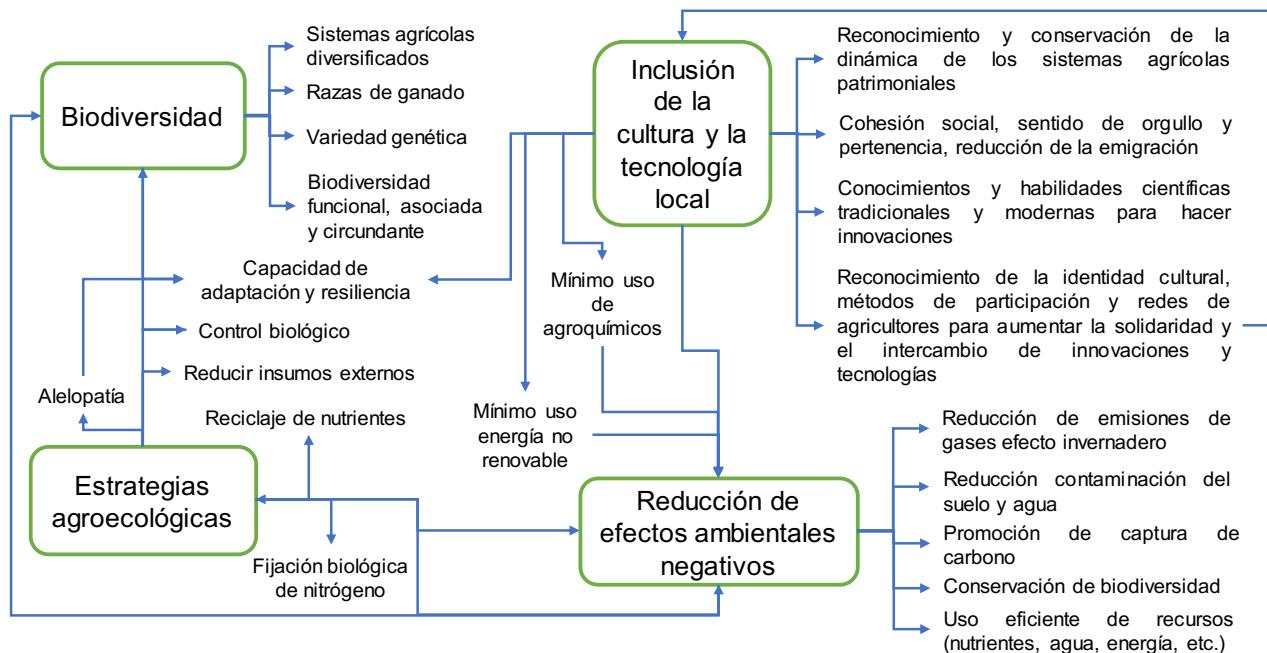
- Optimizar el uso de insumos localmente disponibles (plantas, animales, suelo, agua, clima y comunidades) de manera que se complementen y se obtengan los mayores efectos sinérgicos posibles.
- Mejorar el potencial productivo teniendo en cuenta las limitantes ambientales locales (suelo, clima, disponibilidad de agua) asegurando la sostenibilidad a largo plazo de la producción.
- Conservar la biodiversidad, mediante el uso óptimo del potencial biológico y genético de las especies de plantas y animales presentes dentro y alrededor del agroecosistema.
- Incluir el conocimiento y las prácticas locales en el diseño y manejo del agroecosistema.
- Reducir el uso de insumos externos no renovables. Remplazar los insumos externos mejorando el reaprovechamiento de nutrientes mediante el reciclado de biomasa y optimizar la disponibilidad de nutrientes.
- Mejorar las condiciones del suelo para favorecer el crecimiento de las plantas mediante el aumento de la actividad biótica en el suelo y manejo de la materia orgánica.
- Reducir las pérdidas por flujos de radiación solar, aire y agua mediante el manejo del microclima. Implementar alternativas como la cosecha de agua y el manejo de suelo a través del aumento de la cobertura.
- Aumentar la biodiversidad, diversificar específica y genéticamente el agroecosistema en el tiempo y el espacio, aumentando las interacciones biológicas y los sinergismos promoviendo procesos y servicios ecológicos claves.

Las estrategias para aplicar estos lineamientos en el agroecosistema dependen de las condiciones locales, los recursos disponibles y el mercado. Estas estrategias pueden tener diferentes efectos sobre los atributos de sostenibilidad del agroecosistema (Altieri, 2002).

En el diseño de agroecosistemas sostenibles Altieri (1995) y Gliessman et al. (1998) citados por Altieri, Koohafkan y Giménez (2012, p.10) proponen incluir macroaspectos como son: la

biodiversidad, las estrategias agroecológicas, la cultura, la tecnología local y la reducción de los efectos ambientales. Estos macroaspectos son establecidos mediante características específicas, altamente relacionadas con la generación de servicios ecosistémicos en agroecosistemas. En la figura 1-4 se presentan las interrelaciones entre los macroaspectos (biodiversidad, estrategias agroecológicas, cultura y tecnología local, y reducción de efectos ambientales negativos) y las características que los componen.

Figura 1-4. Macroaspectos de sostenibilidad del agroecosistema



Fuente: autor (2018) basado en Reijntjes et al. (1992); Pret (1994); Vandermeer (1995); Vandermeer y Perfecto (1995); Gliessman et al. (1998); Altieri (1995); Altieri y Nicholls (2007); Altieri et al. (2012).

En primer lugar, se encuentra la biodiversidad, la cual hace referencia a la riqueza del agroecosistema en cuanto a integrar en su diseño subsistemas diversificados, agrícola, forestal y pecuario con alta variedad que permitan generar las condiciones para contar con biodiversidad, planificada, asociada y circundante (Vandermeer & Perfecto, 1995; Altieri & Nicholls, 2007). La biodiversidad planificada corresponde a los cultivos y animales incluidos intencionalmente por el ser humano dentro del agroecosistema. La biodiversidad asociada abarca toda la flora y fauna del suelo (fitófagos, carnívoros, descomponedores) que colonizan el agroecosistema desde el medio. Finalmente, la biodiversidad circundante hace referencia a la biodiversidad fuera del agroecosistema que provee a la biodiversidad asociada al colonizar el agroecosistema desde afuera y prospera dependiendo del manejo y estructura implementados.

Las interacciones y sinergismos entre la biodiversidad planificada y la biodiversidad asociada promueven funciones dentro del agroecosistema, principalmente funciones de regulación (regulación de nutrientes, polinización, control biológico, regulación de microclimas) que proveen servicios ecosistémicos como conservación de la fertilidad del suelo, polinización de cultivos, control de plagas y enfermedades en los cultivos. Además de funciones de hábitat que proveen servicios como el mantenimiento de plantas y animales empleados dentro del agroecosistema y funciones de producción que proveen servicios como generación de cosechas y proteína animal para consumo humano.

Altieri (2002) expone que el aumento de la biodiversidad en un agroecosistema mejora la coexistencia e interacción benéfica entre las especies, genera una mejor adaptación a la heterogeneidad del hábitat llevando a una complementariedad en las necesidades de las especies de cultivo, proporciona un mejor control de poblaciones especialmente plagas, aumenta los microclimas que pueden ser ocupados por un rango más amplio de organismos, aumenta la conservación de la biodiversidad en ecosistemas circundantes, aumenta el reciclaje de nutrientes y reduce las pérdidas por eventos extremos al existir variedad de cultivos.

En segundo lugar, el agroecosistema debe contar con estrategias agroecológicas las cuales se derivan de la riqueza en biodiversidad. Generando condiciones de adaptación y resiliencia a eventos extremos, alternativas productivas para hacer frente a la variabilidad de los mercados, minimización de insumos externos derivados de SE como el reciclaje de nutrientes, fijación de nitrógeno, control biológico de plagas y reducción de costos de mantenimiento.

Para el diseño de agroecosistemas sostenibles, se emplean estrategias como la agroforestería, los policultivos y otros métodos de diversificación que imitan los procesos ecológicos logrando un uso eficiente de la luz solar, los nutrientes y el agua (Pret, 1994) citado por Altieri (2002, p. 30). Estas estrategias son ricas en complementariedades y sinergismos al combinar cultivos, árboles y animales en arreglos temporales y espaciales diversificados (Altieri, 2002).

Para manejar de manera óptima un agroecosistema se debe contar con un alto nivel de interacciones. La diversidad facilita los sinergismos que a su vez proveen servicios ecosistémicos como la activación de la biología del suelo, el reciclado de nutrientes, el aumento de microrganismos e insectos benéficos. En las estrategias para mejorar la diversidad se encuentran las rotaciones de cultivos, cultivos de cobertura, policultivos, mezclas de cultivo y ganadería (Altieri, 2002). **Estas estrategias proveen las siguientes características ecológicas al agroecosistema:**

- Rotaciones de cultivo: la diversidad derivada de las rotaciones mejora la disponibilidad de nutrientes para cada cultivo, además interrumpe el ciclo de vida de insectos plaga y malezas (Sumner, 1982) citado por Altieri (2002, p. 31).
- Policultivos: consisten en sistemas de cultivo conformados por dos o más especies, las cuales son plantadas con proximidad espacial que resulta en competencia o complemento para mejorar los rendimientos (Vandermeer, 1989) citado por Altieri (2002, p. 31).
- Sistemas agroforestales: consisten en la plantación de árboles con cultivos anuales y/o la crianza de animales. Los árboles proveen funciones de protección al cultivo y producción de madera, frutas, forraje. Este sistema aumenta las relaciones complementarias entre los componentes incrementando el uso múltiple del agroecosistema (Nair, 1984) citado por Altieri (2002, p. 31).
- Cultivos de cobertura: consiste en la plantación de leguminosas u otras especies anuales. Generalmente debajo de especies frutales perennes con el fin de mejorar la fertilidad del suelo, aumentar el control biológico de plagas y modificar el microclima del huerto (Finch & Sharp, 1976) citado por Altieri (2002, p. 31).
- Integración animal en el agroecosistema, para mejorar la producción de biomasa y el reciclaje (Pearson & Ison, 1987) citado por Altieri (2002, p.31).

Estas estrategias permiten que un agroecosistema sostenible integre sus componentes para aumentar la eficiencia biológica, preservar la biodiversidad, mantener la capacidad productiva y autorreguladora imitando la estructura y función de los ecosistemas naturales locales. Las estrategias aumentan la diversidad de las especies, promueven un suelo biológicamente activo,

mejoran el control natural de plagas, aumentan el reciclaje de nutrientes, minimizan las pérdidas de recurso hídricos, controlan la erosión y la escorrentía superficial (Altieri, 2002).

En tercer lugar, la inclusión de la cultura y tecnología de las poblaciones locales, trae beneficios como la conservación de la base genética, al rescatar especies ancestrales e incluirlas dentro del agroecosistema. Estas especies adaptadas a las condiciones locales proveen condiciones que mejoran la resiliencia del agroecosistema, tanto productiva como social. **Productiva al contar con especies resistentes a sequias e inundaciones que generen productos alternativos, y social, al conservar las tradiciones y costumbres de las comunidades y las técnicas de producción, generan a su vez sentido de pertenencia y cohesión social que puede mejorar las condiciones de asociación y organización de las comunidades, mediante estrategias de acción colectiva que a su vez retroalimenten la sostenibilidad de los agroecosistemas y promuevan los SE.**

Por último, la reducción de efectos ambientales mediante la disminución del uso de energía no renovable y la implementación de estrategias agroecológicas, para hacer un uso eficiente de los recursos naturales, conservar la biodiversidad y los SE derivados.

En conclusión, los macroaspectos antes analizados, aportan al diseño y establecimiento de agroecosistemas sostenibles que conserven y provean a su propio funcionamiento y al entorno funciones y SE. Los macroaspectos se constituyen como base para el establecimiento de principios y criterios a ser aplicados en la valoración de SE.

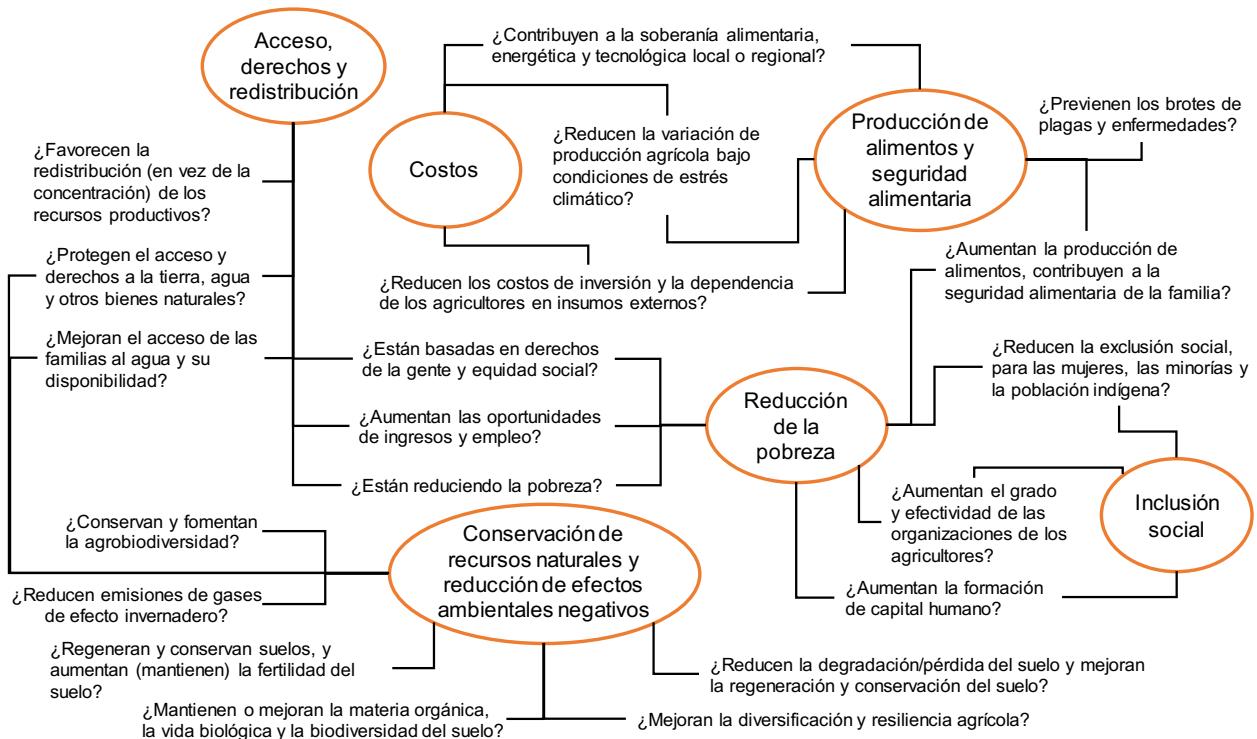
• Agroecosistemas y bienestar

En el diseño de agroecosistemas, Altieri et al. (2012) proponen examinar si las prácticas de manejo establecidas dentro del agroecosistema contribuyen al bienestar rural sostenible. En la medida en que mayor sea la contribución al bienestar rural, las comunidades podrán reconocer y valorar los servicios ecosistémicos que los agroecosistemas proveen para mantener o mejorar sus niveles de bienestar.

Para evaluar el nivel de contribución al bienestar rural Altieri et al. (2012) proponen una serie de preguntas que pueden ser catalogadas en seis nodos temáticos. **El primer nodo es asociado al acceso, derechos y redistribución de los recursos productivos, recursos naturales e ingresos.** El segundo nodo se relaciona con los costos de inversión, insumos y tecnología. El tercer nodo se liga con la producción de alimentos y seguridad alimentaria. El cuarto nodo se asocia a la inclusión social, organizacional y de capital humano. El quinto nodo tiene relación con la reducción de la pobreza al reducir la exclusión social y aumentar oportunidades de ingresos. El sexto y último nodo temático involucra la conservación de los recursos naturales y la reducción de efectos ambientales negativos. **Las relaciones entre los nodos temáticos y las preguntas propuestas por Altieri et al. (2012) se presentan en la figura 1-5.**

El primer nodo identificado derivado del trabajo de Altieri et al. (2012) denominado acceso, derechos y redistribución está relacionado con el problema de la inequidad, entendida como el acceso a los recursos productivos, tierra, semillas, agua, biodiversidad agrícola, tecnologías agroecológicas, redes de producción, crédito, mercados locales e ingresos. La distribución equitativa de los recursos productivos generará equidad en términos de distribución de tierras, ingresos para inversión en el agroecosistema y compra de otros bienes requeridos para el proceso productivo (herramientas, tecnología, riego). El aumento de las oportunidades de empleo e ingresos se traduce en la capacidad de las comunidades de producir alimentos a nivel local, generando resiliencia productiva y social, además de autonomía y mejores condiciones para lograr la seguridad alimentaria.

Figura 1-5. Propuesta de análisis sobre el aporte de los agroecosistemas al bienestar



Fuente: autor (2018) basado en Altieri et al. (2012)

El segundo nodo denominado costos de inversión, insumos y tecnología, está relacionado con los costos y la dependencia de insumos energéticos (fertilizantes). La dependencia es reducida por alternativas que mejoran el reciclado de biomasa y la disponibilidad de nutrientes (compostaje, abonos verdes, sistemas agroforestales). Al reducir la dependencia de insumos de síntesis química se reducen además de los costos de producción, los costos derivados del daño al recurso hídrico, el suelo, el aire, la fauna silvestre, la biodiversidad, y salud humana. Además, se mejora la soberanía energética, definida por Altieri y Nicholls (2012) como “el derecho de toda la población rural a generar energía suficiente para sus operaciones dentro de los límites ecológicos a partir de fuentes sostenibles”. Por otra parte, al aplicar principios agroecológicos es posible adaptar las tecnologías agrícolas locales, generando conocimientos con la participación de las comunidades, quienes implementan la tecnología según las condiciones variables y diversas de los agroecosistemas.

El tercer nodo denominado producción de alimentos y seguridad alimentaria, se relaciona con aspectos como la generación de una producción más diversa de cultivos. La implementación de alternativas para mejorar la variedad como el uso de especies locales, la inserción de los subsistemas pecuario y forestal en el agroecosistema son alternativas que generan diversificación de la producción. Estas alternativas garantizan alimentos ricos en proteínas, frutas y vegetales que aportan una alimentación más diversa, resiliente a los escenarios de cambio climático y variabilidad climática que fortalecen las condiciones de soberanía alimentaria, definida como “el derecho del pueblo para producir, distribuir y consumir alimentos saludables y cerca de su territorio, de manera ecológicamente sostenible” (Altieri & Nicholls, 2012, p.72).

El cuarto nodo, se asocia a la inclusión social, organizacional y de capital humano. Un agroecosistema sostenible que aporta al bienestar rural debe producir alimentos de manera socialmente equitativa, mejorando la participación individual y colectiva a través del reconocimiento de la identidad cultural y la aplicación del conocimiento tradicional. El diseño e implementación de agroecosistemas sostenibles debe incluir la acción colectiva, de manera que se permita la participación y la generación de estrategias orientadas según las necesidades locales, vía organización, para mejorar la producción, incluir nuevos mercados, realizar el intercambio de experiencias y la generación de conocimientos para contribuir al perfeccionamiento ecológico, social y económico del proceso productivo en el agroecosistema.

El quinto nodo, se relaciona con la reducción de la pobreza en cuanto a derechos y oportunidades. Es consecuencia del mejoramiento del acceso y distribución de los recursos productivos y la reducción de costos, al reducir la dependencia de insumos se asegura la recuperación de los costos de inversión y la rentabilidad, mejorando los ingresos, las oportunidades de empleo y reduciendo la pobreza.

El sexto nodo denominado conservación de recursos naturales, involucra las acciones tomadas en el diseño y manejo del agroecosistema que contribuyen a reducir efectos ambientales negativos. La integración de los subsistemas forestal y pecuario al agroecosistema y la implementación de estrategias como rotación, policultivos, sistemas agroforestales, abonos verdes y compostaje, son alternativas que reducen el uso de insumos de síntesis química, aumentan la biodiversidad, mejoran la conservación de suelos y el reciclaje de nutrientes.

• **Biodiversidad y agrobiodiversidad**

Se denomina biodiversidad al conjunto de genes, especies, ecosistemas y sus relaciones (Wilson, 1992). La agrobiodiversidad incluye los componentes de la diversidad biológica que constituyen el agroecosistema. Es decir, las variedades y la variabilidad de animales, plantas y microorganismos en los niveles genético, de especies y de ecosistemas que son necesarios para mantener las funciones, estructura y procesos. Sin embargo, la agrobiodiversidad no incluye solamente aspectos bióticos, también incluye aspectos abióticos y socioculturales (UNEP, 2000).

Dentro de los aspectos bióticos de la agrobiodiversidad, se encuentran los recursos fitogenéticos y genéticos de animales, peces e insectos, recursos genéticos microbianos y fúngicos que hacen parte de las especies cultivadas, domesticadas y variedades silvestres. Como parte de la agrobiodiversidad, se encuentran organismos y microrganismos que contribuyen a generar procesos, funciones y servicios ecosistémicos, como el ciclo de nutrientes, el control de plagas y enfermedades, la polinización, la conservación de la biodiversidad y de los hábitats, el ciclo hidrológico, el control de la erosión, la mitigación del cambio climático, la captura de CO₂. (UNEP, 2000; Sarandon, 2010)

Los aspectos abióticos de la agrobiodiversidad están constituidos por el suelo, el clima, el régimen hídrico, los cuales tienen un efecto determinante sobre la agrobiodiversidad (UNEP, 2000; Sarandon, 2010). Finalmente, los aspectos socioeconómicos y culturales de la agrobiodiversidad están determinados por las prácticas humanas y las actividades para su gestión, como los conocimientos tradicionales, los factores culturales, la participación, el turismo, los mercados, las vías de comercialización y el paisaje (UNEP, 2000; Sarandon, 2010).

• **Atributos de sostenibilidad en agroecosistemas**

Conway (1986); Marten (1988); Altieri (1989); Adger (2000); Estrada, Garrido y Costabeber (2000); López-Ridaura, Masera y Astier (2002); Harris (2003); Lin (2011); Altieri et al. (2012); Altieri (2013) y Bastida, Alonso y González (2013) plantean que la sostenibilidad de los sistemas agrícolas es entendida como la capacidad para mantener a lo largo del tiempo la productividad pese a elementos distorsionadores. Harrington (1992) y Altieri et al. (2012) plantean que un sistema agrícola es considerado sostenible si conserva una base de recursos naturales y continúa satisfaciendo las necesidades del agricultor en el largo plazo, un sistema que no satisface estos dos requisitos es considerado no sostenible.

Bastida et al. (2013) resaltan que desde la economía ecológica es factible utilizar atributos para medir la eficiencia y eficacia dentro del marco de la sostenibilidad, atributos que pueden ser aplicados a los agroecosistemas. Asimismo, López-Ridaura et al. (2002), Astier, Masera y Galván-Miyoshi (2008) y Altieri et al. (2012) establecen que la sostenibilidad de los agroecosistemas puede ser definida por atributos como productividad, estabilidad, viabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autosuficiencia. Los atributos de sostenibilidad se definen en la tabla 1-1.

Tabla 1-1. Atributos de sostenibilidad en agroecosistemas

Atributos	Descripción
Productividad	Habilidad del agroecosistema para proveer el nivel requerido de bienes y servicios
Estabilidad	Propiedad del sistema de mantener un equilibrio dinámico. Es decir que se mantenga la productividad del sistema en un nivel no decreciente a lo largo del tiempo, bajo condiciones promedio o normales.
Confiabilidad	Capacidad del sistema de mantenerse en niveles cercanos al equilibrio ante perturbaciones normales del ambiente.
Resiliencia	Capacidad de retornar al estado de equilibrio o mantener el potencial productivo luego que el sistema haya sufrido perturbaciones graves.
Adaptabilidad (Flexibilidad)	Capacidad del sistema de encontrar nuevos niveles de equilibrio —es decir, de continuar siendo productivo— ante cambios de largo plazo en el ambiente.
Equidad	La equidad se define como la habilidad del sistema para distribuir la productividad (beneficios o costos) de una manera justa.
Autogestión (autodependencia)	Capacidad del sistema de regular y controlar interacciones con el exterior.

Fuente: compilación Autor (2018) basado en Astier et al. (2008)

El primer atributo de sostenibilidad, la productividad, puede ser alcanzada, en términos de eficiencia y eficacia del agroecosistema y no en términos netamente monetarios. Es decir, la rentabilidad económica no es el único objetivo. La productividad es alcanzada al minimizar dentro del agroecosistema el uso y consumo de recursos no renovables, además de incluir insumos locales generando un sistema productivo más limpio, con menores efectos al medio ambiente, maximizando la producción por unidad de trabajo empleado (Bastida et al., 2013). Un agroecosistema es más productivo en términos de sistema, al considerar las interrelaciones y sinergismos entre sus componentes. La productividad puede ser interpretada en términos energéticos, energía empleada contra energía producida.

En cuanto al segundo atributo, la estabilidad, puede ser interpretada no únicamente en términos de productividad a lo largo del tiempo sino como la constancia de la producción bajo un conjunto de condiciones económicas, ambientales y de gestión cambiantes Altieri (1989). Es decir, existen tres fuentes de estabilidad: la estabilidad de gestión, interpretada como la posibilidad de elección de tecnologías mejor adaptadas a las necesidades y recursos locales. La estabilidad cultural, como el mantenimiento de la organización, su contexto sociocultural y sus sistemas productivos a través de las generaciones. Finalmente, la estabilidad económica, asociada a la capacidad de los

agricultores para predecir precios y tendencias de mercado, eventos externos y adaptar sus cultivos y estrategias para sostener su renta.

En cuanto a la confiabilidad en los agroecosistemas las perturbaciones pueden llevar a una variable crítica del proceso a estados en los que dejan de operar los mecanismos de autorregulación que permiten que la perturbación se revierta. La confiabilidad está asociada a condiciones del agroecosistema como la diversidad de especies y cultivos, la conservación de recursos naturales, la fragilidad del sistema en cuanto a incidencia de plagas y enfermedades y la vulnerabilidad social de las organizaciones campesinas y los productores individuales, condiciones que permiten que el agroecosistema se mantenga ante perturbaciones normales del ambiente (Astier et al., 2008).

El cuarto atributo, la resiliencia en agroecosistemas, va más allá de mantener el potencial productivo por la acción de perturbaciones severas, porque además incluye la propiedad de un sistema de retener su estructura organizativa después de una perturbación. La resiliencia socioecológica se define como la capacidad que tienen los agroecosistemas para mantener su organización y unos niveles satisfactorios de producción, tras una perturbación sin poner en riesgo la organización de los sistemas sociales y biológicos que constituyen su entorno (Gómez et al., 2015). La resiliencia ecológica y social en agroecosistemas puede ser potenciada a través de los servicios ecosistémicos (Altieri, 2013). La resiliencia depende de las especies existentes en el agroecosistema, la diversidad genética incluida en el diseño y el manejo de agroecosistemas se constituye en la determinante principal de la resiliencia (Altieri, 2013). Las interacciones y sinergismos generan procesos que brindan la capacidad de adaptarse a condiciones cambiantes generadas por eventos extremos (Harris, 2003).

La adaptabilidad, como atributo de sostenibilidad en agroecosistemas, es la capacidad de las comunidades de construir resiliencia a través de acciones colectivas. La capacidad de construir resiliencia en un agroecosistema depende del contexto sociocultural (nivel de organización, gobernanza, conocimiento tradicional, etc.) que lo nutre y de la capacidad de reaccionar, movilizarse y de adaptarse de los grupos humanos que los manejan, modificando los sistemas socioecológicos cuando las condiciones ambientales, socioeconómicas o políticas son críticas (Adger, 2000) citado por Altieri (2013). En este contexto, la vulnerabilidad no está determinada tanto por la magnitud del stress ambiental sino por la capacidad social de lidiar y/o recuperarse del cambio ambiental Altieri (2013).

En cuanto a la Equidad, un proceso productivo es equitativo si permite distribuir de manera apropiada los beneficios y costos entre sus beneficiarios. La equidad es un mecanismo de autorregulación que permite acuerdos de cooperación dentro de las comunidades. Finalmente, la autogestión, está relacionada con la participación, la dependencia de insumos, energía y tecnologías, el reconocimiento de derechos y la eficiencia de las organizaciones que involucra además la capacidad de decisión en el diseño y manejo del agroecosistema.

Desde la economía ecológica y la agroecología, los atributos de sostenibilidad (productividad, estabilidad, viabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autosuficiencia) permiten valorar desde diferentes perspectivas los SE, incluyendo formas de valoración desde las dimensiones ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política.

1.1.1.2 Del concepto de agroecosistema al concepto de agroecosistema sostenible

Es relevante hacer una diferenciación entre el concepto de agroecosistema y el concepto de agroecosistema sostenible y su relación con la generación de SE. En este sentido, desde la literatura agroecológica un agroecosistema sostenible (AS) incorpora tres rasgos fundamentales: **el primero es ser diseñado y manejado como un sistema complejo, el segundo es implementar macroaspectos de sostenibilidad y el tercero es el aporte del AS al bienestar de las comunidades.**

- a) Primer rasgo, ser diseñado y manejado como un sistema complejo (Reijntjes, Haverkort & Waters, 1992; Pret, 1994; Vandermeer, 1995; Altieri, 2002). Implica que su estructura o configuración espacial interna genere conectividad entre sus sistemas productivos y el entorno, permitiendo el movimiento e intercambio de especies animales y vegetales, y generando regulaciones funcionales de distinto orden que inciden en la producción (León, 2014). El ser manejado como un sistema complejo promueve la variedad de especies en el agroecosistema, reduce su dependencia de insumos externos, disminuye los efectos negativos ambientales y sociales, y genera que este tipo de sistema aumente su semejanza estructural y funcional a los ecosistemas de la región biogeográfica donde se desarrolla, incrementando su sostenibilidad (Gliessman, Engles & Krieger, 1998; Altieri, 2002).
- b) Segundo rasgo, la implementación de cuatro macroaspectos de sostenibilidad, como son la biodiversidad, las estrategias agroecológicas, la reducción de efectos ambientales, y la inclusión de la cultura y la tecnología local (Reijntjes et al., 1992; Pret, 1994; Vandermeer, 1995; Vandermeer & Perfecto, 1995; Gliessman et al., 1998; Altieri & Nicholls, 2007; Altieri et al., 2012). Las relaciones entre los macroaspectos se presentan en la figura 1-4.

La biodiversidad hace referencia a la integración de subsistemas diversificados, agrícola, forestal y pecuario con alta variedad que permitan generar las condiciones para contar con biodiversidad planificada (cultivos y animales dentro del agroecosistema), asociada (flora y fauna del suelo) y circundante (biodiversidad que coloniza el agroecosistema desde afuera) (Vandermeer & Perfecto, 1995; Altieri & Nicholls, 2007). Las interacciones y sinergismos entre la biodiversidad planificada y la biodiversidad asociada promueven funciones de regulación que proveen servicios ecosistémicos en el agroecosistema como conservación de la fertilidad del suelo, polinización, control de plagas y enfermedades en los cultivos, además de funciones de hábitat que proveen condiciones para la biodiversidad circundante, y funciones de producción como la generación de cosechas y proteína animal para consumo humano (Vandermeer & Perfecto, 1995; Altieri & Nicholls, 2007).

El segundo macroaspecto de sostenibilidad relacionado con la implementación de estrategias agroecológicas, busca reducir el nivel de dependencia de los componentes antropocéntricos (maquinaria, fertilizantes, semillas, agua de irrigación), principalmente la energía no renovable en forma de agroquímicos. Esta reducción se logra mediante el ciclaje de nutrientes, la generación de microclimas, el control biológico, el uso de los componentes naturales (radiación solar, lluvia, viento, sedimentos, nutrientes y energía) (Pret, 1994; Altieri, 2002, Gliessman, 2002). A su vez, las estrategias agroecológicas contribuyen a que se establezca el tercer macroaspecto de sostenibilidad, la reducción de efectos ambientales negativos, al minimizar la emisión de gases de efecto invernadero, controlar la contaminación, promover el secuestro de carbono y el uso eficiente de los

componentes naturales (Gliessman et al., 1998; Altieri, 1995; Altieri & Nicholls, 2007; Altieri et al., 2012).

Finalmente, el cuarto macroaspecto de sostenibilidad asociado a la inclusión de la cultura y la tecnología local, mejora la resiliencia del agroecosistema, entendiéndose por **resiliencia la capacidad del sistema para retornar a su estado de equilibrio luego de una perturbación**. El sistema es resiliente al contar con especies resistentes a sequias e inundaciones que mantienen la productividad y al conservar las tradiciones de las comunidades, generando sentido de pertenencia y cohesión que deriva en mejores condiciones para la asociación y la organización (Gliessman et al., 1998; Altieri & Nicholls, 2007; Altieri et al., 2012).

- c) Tercer rasgo, el aporte al bienestar de las comunidades, reflejado en la productividad, estabilidad, viabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autosuficiencia en el agroecosistema (López-Ridaura, Masera & Astier, 2002; Astier, Masera & Galván-Miyoshi, 2008; Altieri et al., 2012; Bastida, Alonso & González, 2013).

Al integrar los tres rasgos, en esta investigación se propone el siguiente concepto de agroecosistema sostenible: *el agroecosistema sostenible es un ecosistema modificado para la producción de bienes y servicios que genera bienestar a las comunidades. Es un sistema complejo que incluye variables y relaciones ecológicas, socioculturales, económicas, tecnológicas y políticas. Se diseña y maneja para imitar la estructura y función de los ecosistemas locales, involucrando el conocimiento tradicional y científico, de manera que las interacciones ecológicas, y los sinergismos entre sus componentes, generen funciones y SE que garanticen en el tiempo la productividad y la protección del sistema a variables externas* (Autor, 2018) basado en Altieri y Nicholls (2000); Altieri (2002); Gliessman (2002); Altieri y Nicholls (2007); León (2009); Altieri et al. (2012); Altieri (2013); Sarandón y Flores (2014).

La propuesta del concepto de agroecosistema sostenible permitirá identificar dentro de la investigación las características con que debe contar un agroecosistema, sobre el cual, puedan ser identificados, analizados y valorados los SE.

1.1.2 Economía ecológica

En la década de los 50's y 60's, los economistas neoclásicos plantearon teorías sobre el crecimiento económico, como objetivo político para aliviar la pobreza, manteniendo de forma tácita una visión de recursos naturales infinitos. A inicios de los 70's, la economía neoclásica tuvo que prestar atención a los problemas de contaminación, uso y escasez de recursos naturales (especialmente el petróleo) generando nuevos campos especializados de la economía como la "economía de los recursos naturales" y la "economía ambiental". Sin embargo, estas ciencias no involucran un interés real en comprender las relaciones entre los sistemas económicos y ecológicos (Common & Stagl, 2008).

Si bien la racionalidad que subyace en el uso de los recursos naturales bajo la revolución verde fue básicamente económica y tecnológica, los sistemas agrícolas actuales ya no pueden enmarcarse en estas restricciones. Los estudios puramente disciplinares sobre los sistemas agrícolas, no logran abarcar el tejido complejo que se desarrolla desde y hacia estos sistemas. Así, es necesario establecer las relaciones, influencias y retroalimentaciones que las políticas agrarias, económicas y ambientales pueden generar, como: las dinámicas de los mercados, los hábitos de los consumidores, la cultura e historia que subyace en los territorios donde se lleva a cabo la actividad agrícola, las creencias, espiritualidades, las relaciones sociales, entre las

comunidades agrícolas, los ecosistemas, y sus espacios de producción. Aspectos que solamente esbozan la complejidad de un sistema agrícola y ponen de manifiesto la necesidad de planteamientos teóricos que aporten a su comprensión (Casanova, Martínez, López & López, 2016).

Siendo insuficientes los acercamientos desde la economía neoclásica para comprender y atender la crisis del modelo agrícola, se gesta una nueva vertiente que se denominó **economía ecológica (EE)**, liderada por el matemático y estadístico Nicholas Georgescu Roegen, quién desde 1967 planteó cómo el proceso económico está sujeto a las leyes físicas, termodinámicas y ecológicas. Por ejemplo, la ley de la entropía, en la que todo cuerpo tiende a su máximo estado de desorden, y las leyes de conservación de la materia y energía, en la que la materia o la energía no se crean ni se destruyen, únicamente se transforman (Georgescu-Roegen, 1996). De allí, la economía ecológica surge como un intento de comprender cómo las leyes naturales determinan los procesos económicos, incluidos los sistemas agrícolas.

Aunado a los planteamientos de Georgescu, el biólogo y el filósofo austriaco Bertalanffy (1992) desde su teoría general de sistemas aporta herramientas para identificar y comprender las interacciones básicas de diferentes sistemas, de manera que al identificar estas interrelaciones puedan ser extrapoladas para comprender todos los sistemas. Así mismo, el ecólogo Odum (1980) plantea el análisis de emergía como la energía útil usada para generar un producto o servicio, resaltando a la energía solar como la fuente básica para los procesos y funciones ecosistémicas. Es decir que todos los productos y servicios tienen su respaldo en la energía solar.

Desde estas perspectivas, la economía ecológica concibe a la economía como un proceso abierto que debe ser analizado desde su interrelación con los ciclos bioquímicos. Concibiendo que los ecosistemas proveen recursos, funciones y servicios ecosistémicos para el ser humano y sus actividades. Por otra parte, debido al carácter de no renovable de varios recursos y funciones ecosistémicas, el crecimiento económico está limitado por razones físicas y no por razones solamente económicas (Foladori, 2001). En vista de lo anterior, la economía ecológica plantea al sistema económico como un subsistema abierto dentro de la biosfera que intercambia energía, materia e información y, por lo tanto, está sujeto a las leyes y límites de la biosfera, como las leyes de la termodinámica, al incorporar material de baja entropía desde el entorno para su proceso y retornar material energético de alta entropía derivado del trabajo del sistema, es decir la producción y consumo de bienes y servicios que generan **externalidades negativas (contaminación)** (Castiblanco, 2007).

Por otra parte, la economía ecológica entiende la actividad económica como la utilización de los ecosistemas, donde los aspectos biofísicos y energéticos como las leyes de la termodinámica, limitan la escala de desarrollo económico y donde se debe diferenciar entre capital humano, capital natural y capital social, los cuales no son intercambiables ni remplazables (León, 2009), planteamiento fundamental de la teoría de la sostenibilidad fuerte.

Se considera capital humano al nivel de capacitación de los integrantes de una comunidad, incluyendo experiencia, habilidades, educación y destrezas en una o varias actividades, se mide en términos de nivel de educación alcanzado, y también incluye la capacidad de liderazgo, experiencia acumulada, conocimiento local y nivel de salud (Chiappe, 2002). El capital natural está compuesto por la cantidad y calidad de los recursos naturales (agua, suelo, aire, biodiversidad, paisaje) y está asociado a los bienes y servicios ecosistémicos que generalmente no son percibidos por la sociedad (Chiappe, 2002). Estos intangibles son un activo ambiental perdido (costo) que es incorporado desde la visión de la economía ecológica (Jobbágy, Paruelo & Laterra, 2011). Finalmente, el capital social, está conformado por las normas colectivas de reciprocidad y

confianza mutua entre las personas y los aspectos de la organización social que facilitan la coordinación y la cooperación para el beneficio mutuo (Chiappe, 2002).

Asimismo, la economía ecológica advierte de manera crítica sobre la no sustentabilidad de la economía capitalista en dos aspectos fundamentales enunciados por Martínez-Alier (2006): el primero, es la incommensurabilidad monetaria de valores como “la pérdida de biodiversidad, la pérdida de patrimonio cultural, el daño al sustento humano, la pérdida de autonomía o del derecho de autodeterminación local”, el segundo, el concepto de servicios ecológicos distributivos, desde el ecologismo de los pobres y la justicia ambiental, al descartar algunos lenguajes de valoración e imponer otro, habitualmente el monetario.

Es así como la economía ecológica se formula desde las relaciones sistémicas, con lo cual el proceso económico es complejo, abierto y diferenciado, aunque ligado a los procesos ecológicos y sociales como parte de su entorno. La economía ecológica considera a la economía como un subsistema de la ecósfera, y acepta que la humanidad y su economía deben someterse a los límites impuestos por las restricciones biofísicas que imponen los ecosistemas, fuente de los bienes y servicios que los alimentan (Goodland & Daly, 1996).

Es por tanto que el proceso económico, en la teoría de la economía ecológica, se sustenta en las relaciones ecósfera – econósfera, donde, según Gómez, Vargas y Posada (2007, p. 69), la ecósfera es “el conjunto de operaciones que se despliegan sobre todo el planeta y por medio de las cuales recicla la materia y fluye la energía que alimenta la vida”, la econósfera es un sistema resultante de las condiciones sociales que se desarrollan como parte de la biósfera, siendo artificial en su esencia, y puede ser modificada por las decisiones sociales. De esta forma, la sostenibilidad de la econósfera se encuentra supeditada a las estructuras disipativas que le permiten incorporar los suministros energéticos y materiales de la ecósfera, y de la capacidad de desechar hacia ésta los residuos energéticos y materiales generados por el proceso económico (Gómez et al., 2007).

Del mismo modo, la economía ecológica reconoce cómo, los elementos que determinan directamente la comprensión de la termodinámica del planeta, influencian el crecimiento económico, la dinámica poblacional humana y la biodiversidad. Los cambios en estos elementos se encuentran ligados a cambios en los límites de la ecósfera tanto en términos físicos como biológicos (Gómez et al., 2007). En la investigación de Gómez et al. (2007) la economía ecológica contempla los límites físicos y biológicos y las intrincadas relaciones entre éstos. Se consideran los límites físico – espaciales, asociados a la superficie fija del planeta que alberga todo el espacio posible para la operatividad de la ecósfera. También están los límites de la manipulación energética, siendo la ecósfera y la econósfera sistemas abiertos a la entrada de energía, donde la más importante es la energía solar.

Además de los límites físicos y espaciales, existen límites de carácter tecnológico para el aprovechamiento eficiente de la energía, asumiendo las pérdidas como la disipación de la energía y las radiaciones emitidas en procesos de transformación. A este respecto el balance energético es crucial, ya que, si para el desarrollo de los procesos internos del sistema se requiere de una cantidad de energía exterior mayor a la disponible, el sistema entrará en crisis o colapsará (Gómez et al., 2007).

Gómez et al. (2007) sostienen que otro límite reconocido en la economía ecológica es el llamado “bucle eco-organizador”: dióxido de carbono – oxígeno molecular, regulado por la relación de los organismos fotosintéticos con la atmósfera, bucle regulado por la biósfera. Con la velocidad de inserción de dióxido de carbono a la atmósfera por parte de los procesos productivos de la econósfera, la pérdida de organismos fotosintéticos por la deforestación y el alto consumo de

oxígeno para procesos de combustión, se desarrollan estados de no regulación de la biosfera, lo que genera efectos como el calentamiento global. Existen también límites relacionados con el bucle eco-organizador del agua, el límite demográfico, el límite de la biodiversidad y el límite de la plasticidad, o capacidad de adaptación de la vida.

Adicionalmente, al admitir determinantes y límites físicos y ecológicos sobre la econósfera, la economía ecológica plantea discusiones y transformaciones sustanciales a la economía convencional en aspectos como (Gómez et al., 2007):

- Redefinir el bienestar más allá del tener y asociándolo a la satisfacción del ser.
- Transformar la producción económica para garantizar el libre desarrollo de los ciclos ecológicos y equilibrios termodinámicos.
- Sustituir los conceptos de libre mercado, libre empresa y crecimiento económico con decisiones sociales – políticas dentro de los límites de la ecósfera.
- Incorporar materias y espacios naturales a la economía de mercado.
- Estabilizar y desarrollar estrategias de control al consumo de energía.

Considerando las perspectivas de la economía ecológica, el cambio de paradigma en la concepción de la economía, el enfoque sistémico, el reconocimiento de los límites biofísicos, termodinámicos y auto reguladores del planeta tierra, y la visión socio ambiental de la economía, se han planteado definiciones de lo que sería la economía ecológica. Al respecto León (2009) argumenta que la economía ecológica es una ciencia de estudios transdisciplinar, cuyo objetivo es la gestión de la sostenibilidad al estudiar las interacciones de la sociedad y la naturaleza. Además, define que la economía ecológica adopta la teoría de sistemas para la comprensión de los fenómenos ecológicos, al integrarlos a los límites físicos y biológicos en los que se enmarca el crecimiento económico.

Asimismo, Naredo (1994) señala que la economía ecológica es la ciencia de la gestión de la sustentabilidad, entendida ésta como la viabilidad en el tiempo de un sistema. Por tanto, la economía ecológica busca extender la valoración de aquellas partes del proceso físico de producción y gasto que escapaban a la visión usual de los economistas. Por otra parte, la economía ecológica incluye la dimensión social, al analizar aspectos de equidad, distribución, ética y procesos culturales como elemento central de la sustentabilidad, constituyéndose entonces en una visión sistémica y transdisciplinaria sobre pasando el actual paradigma económico (León, 2009). Más aún, la economía ecológica busca la integración de la dinámica de los ecosistemas en los distintos instrumentos de política ambiental, buscando una coevolución de la economía, la ecología y las ciencias políticas (Martínez-Alier & Roca, 2003).

Sumado a las anteriores definiciones, Castiblanco (2007) plantea a la economía ecológica como una disciplina científica que integra elementos de la economía, la ecología, la termodinámica, la ética y otras ciencias naturales y sociales, para proveer una perspectiva integrada y biofísica de las interacciones que se entrelazan entre economía y entorno. Asimismo, sugiere que la economía ecológica surge como un enfoque transdisciplinario para generar instrumentos y bases conceptuales que puedan analizar el impacto humano sobre el entorno. A este respecto, Rodríguez (2015) propone que la economía ecológica busca explicar la utilización de la energía y de los materiales de los ecosistemas humanos valorando las externalidades ecológicas como la destrucción de los recursos naturales, la generación de desechos y los efectos nocivos a nivel global, como efectos trasladados a las generaciones futuras.

La economía ecológica permite el abordaje de los servicios ecosistémicos desde una perspectiva sistémica y transdisciplinaria, al incorporar la complejidad de las funciones ecológicas, mediante

metodologías para el estudio de sistemas complejos que permiten analizar las interrelaciones de variables ecológicas, económicas y socioculturales (Gómez et al., 2007). En esta visión crítica, holística e integradora que la economía ecológica plantea sobre las interrelaciones de los procesos económicos, la política, la naturaleza, el mercado, la sociedad y las costumbres o hábitos humanos, subyace la perspectiva apropiada, tanto teórica como metodológica, para lograr acercamientos a la valoración de servicios ecosistémicos en agroecosistemas.

1.1.3 Servicios ecosistémicos

A mediados del siglo XX el deterioro ambiental como consecuencia del sistema de producción y consumo insostenible promovió el debate científico y político sobre la necesidad de conciliación entre las actividades económicas y la conservación de los ecosistemas (Fréguin-Gresh, Baranger, Rapidel & Le Coq, 2015). Paralelamente, la necesidad de comprender los aspectos relacionados con el deterioro de los ecosistemas (cambio climático, variabilidad climática, deforestación, pérdida de biodiversidad) y las consecuencias de este menoscabo sobre el bienestar humano generó el proyecto Evaluación de Ecosistemas del Milenio, el cual centró el debate de la sostenibilidad hacia la valoración de los servicios ecosistémicos (SE) (Fréguin-Gresh et al., 2015).

Daily (1997) define los SE como las condiciones y procesos a través de las cuales los ecosistemas y las especies que los constituyen sustentan la vida humana y se aplican en decisiones de gestión y política. Asimismo, la Evaluación de Ecosistemas del Milenio define los SE como los beneficios directos o indirectos que la humanidad recibe de la biodiversidad (Leemans & De Groot, 2003). De igual forma, De Groot, Wilson y Boumans (2002) incluyen las funciones del ecosistema a la definición de SE, siendo la capacidad de los procesos y componentes naturales para proporcionar bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas, directa o indirectamente. Estos bienes y servicios están asociados generalmente a funciones de regulación, funciones de hábitat, funciones de producción y funciones de información.

Costanza y Folke (1997) definen los SE como los bienes y servicios derivados de las funciones de los ecosistemas que directa o indirectamente benefician a la población humana. Los bienes se caracterizan por presentar un carácter tangible (alimentos, madera, agua) y los servicios por presentar un carácter intangible (regulación de ciclos minerales, regulación del clima, regulación del ciclo del agua, etc.).

Desde una visión más humanista, se definen los SE como los beneficios directos o indirectos que la humanidad recibe de la biodiversidad. Este concepto de servicios ecosistémicos (SE) ha sido desarrollado para representar la dependencia del bienestar de los seres humanos de los ecosistemas, dependencia que ha generado la necesidad de identificar, medir y valorar los SE (Fréguin-Gresh et al., 2015).

Aunado a la inclusión de funciones y beneficios ofrecidos por los ecosistemas, Fisher, Turner y Morling (2009) definen los SE como los aspectos de los ecosistemas que son utilizados para generar bienestar humano. Por lo tanto, si no se percibe un beneficio por parte de la humanidad, no existe el SE que lo genera. Se requiere entonces, una comprensión de la estructura y los procesos ecológicos que garantizan el funcionamiento de los ecosistemas y que proveen servicios a la población para comprender como los cambios en los SE generan efectos sobre el bienestar humano (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012).

Los SE han sido clasificados por diversos autores: Costanza y Folke (1997) citado por Camacho-Valdez y Ruiz-Luna (2012, p. 8) realizan una clasificación asociada a las funciones de los

ecosistemas que producen o generan bienes o servicios. Posteriormente De Groot et al. (2002) plantean que, una vez que se definen las funciones de un ecosistema, la naturaleza y la magnitud de su valor para las sociedades humanas pueden ser analizadas y evaluadas a través de los bienes y servicios proporcionados por cualquier ecosistema en particular.

A partir de los aportes de De Groot et al. (2002) se estructura una clasificación de los SE en cuatro categorías principales que abarcan 23 funciones. Las categorías principales se dividen en funciones de regulación (procesos ecológicos esenciales), funciones de hábitat (provisión de condiciones espaciales para el mantenimiento de la biodiversidad), funciones de producción (capacidad de generación de biomasa que pueda usarse como alimento, tejido, energía) y funciones de información (contribuciones de los ecosistemas a través del conocimiento, la experiencia y las relaciones culturales con la naturaleza).

Las funciones de regulación relacionan la capacidad de los ecosistemas para regular procesos ecológicos esenciales y sostener procesos vitales como son la regulación de gases, la regulación del clima, prevención de alteraciones, regulación y abastecimiento del agua, retención y formación del suelo, retención de nutrientes, asimilación de residuos, polinización y control biológico (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012). Por otra parte, las funciones de hábitat están relacionadas con la capacidad de los ecosistemas naturales de proporcionar hábitat para plantas y animales (refugio, alimentación, reproducción) contribuyendo a la conservación biológica y diversidad genética. Estas funciones proporcionan servicios como mantenimiento de la diversidad biológica y genética, y de especies comercialmente aprovechables (Camacho-Valdez, & Ruiz-Luna, 2012).

De igual modo, las funciones de producción están relacionadas con los procesos fotosintéticos y autótrofos a partir de los cuales los organismos autoabastecen sus requerimientos orgánicos basados en compuestos inorgánicos generando sustento a consumidores de distinto orden. Estas funciones proporcionan bienes y servicios como alimentos, materias primas, recursos genéticos, recursos medicinales y recursos ornamentales (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012). Finalmente, las funciones de información las cuales abarcan las funciones de referencia que contribuyen al mantenimiento de la salud humana proporcionando recursos estéticos, recreación, enriquecimiento cultural y artístico, enriquecimiento histórico y espiritual, desarrollo cognitivo ciencia y educación (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012). Las funciones, procesos, bienes y servicios derivados de los ecosistemas según De Groot et al. (2002) se presentan en la tabla 1-2.

Tabla 1-2. Funciones, procesos y servicios de los ecosistemas

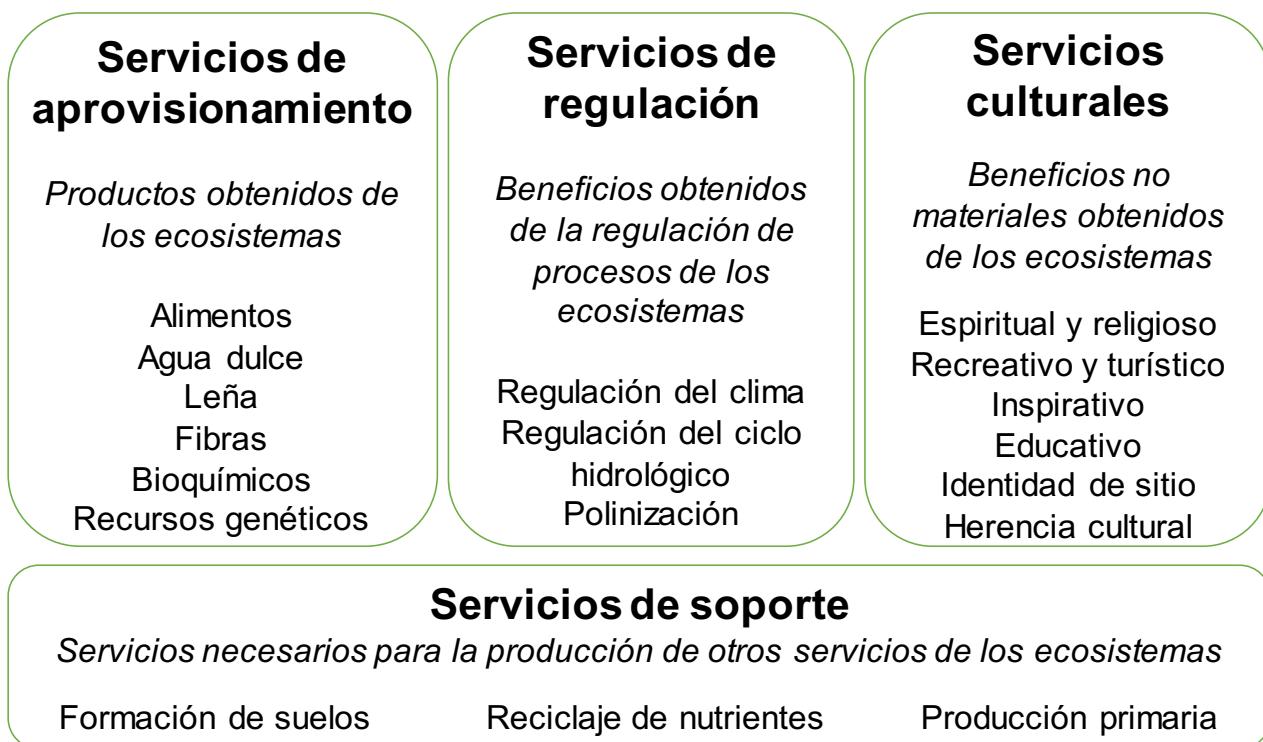
	Funciones	Procesos de los ecosistemas	Servicios ecosistémicos
Funciones de regulación	Regulación de gases	El papel de los ecosistemas en los ciclos biogeoquímicos (por ejemplo, el equilibrio CO ₂ /O ₂ , capa de ozono, etc.).	Protección de los rayos ultravioleta por la capa de ozono. Mantenimiento de la calidad del aire. Influencia en el clima.
	Regulación del clima	Influencia de la cobertura vegetal sobre el clima.	Mantenimiento de un clima favorable (temperatura, precipitación, etc.) para el desarrollo de las actividades humanas, la salud y los cultivos.
	Prevención de alteraciones	Influencia de la estructura de los ecosistemas en la amortiguación de alteraciones o disturbios.	Protección ante tormentas. Prevención de inundaciones.
	Regulación del agua	El papel de la cobertura vegetal en la regulación de la escorrentía y la descarga a los ríos.	Drenaje y riego natural. Medio de transporte.
	Abastecimiento de agua	Filtrado, retención y almacenamiento de agua dulce (ej. Acuíferos).	Suministro de agua para consumo humano, animal, riego y otros usos.
	Retención de suelo	El papel de la vegetación en la retención del suelo.	Mantenimiento de las tierras cultivables. Prevención de daños por la erosión y la sedimentación.

	Funciones	Procesos de los ecosistemas	Servicios ecosistémicos
	Formación de suelo	Meteorización de la roca y acumulación de la materia orgánica.	Mantenimiento de la productividad en las tierras de cultivo.
	Regulación de nutrientes	El papel de la biota en el almacenamiento y reciclaje de nutrientes (por ejemplo, N, P y S).	Mantenimiento de los suelos y de los ecosistemas sanos y productivos.
	Asimilación de residuos	El papel de la vegetación y la biota en la eliminación o degradación de los compuestos en los residuos.	Control de la contaminación o desintoxicación. Filtros de partículas de polvo. Reducción de la contaminación acústica.
	Polinización	El papel de la biota en el movimiento de los gametos florales.	La polinización de especies de plantas silvestres y de los cultivos.
	Control biológico	Control de la población a través de las dinámicas tróficas.	Control de plagas y enfermedades Reducción de daños a los cultivos.
<i>Funciones de hábitat</i>	Hábitat	Espacio vital conveniente para las plantas y animales silvestres.	Mantenimiento de las especies animales o vegetales silvestres y domésticas.
	Mantenimiento de la diversidad biológica	Hábitats convenientes para la reproducción. Funciones de criadero o semillero.	Variedad de plantas y animales utilizadas en agricultura, ganadería, pesca, caza.
	Alimentos	La conversión de energía solar en plantas y animales comestibles.	Generación de cosechas, producción de carne para consumo humano. Construcción y manufactura (por ejemplo, madera y pieles). Combustible y energía (por ejemplo, leña y materia orgánica). Forrajes y fertilizantes (por ejemplo, compost, hojarasca).
<i>Funciones de producción</i>	Materias primas	Conversión de energía solar en biomasa para las actividades humanas.	Mejorar la resistencia de los cultivos frente a patógenos y plagas. Otras aplicaciones (por ejemplo, cuidado de la salud).
	Recursos genéticos	Material genético y la evolución de plantas y animales silvestres.	Medicamentos y productos farmacéuticos. Productos químicos y herramientas. Organismos de prueba y ensayo.
	Recursos medicinales	Variedad en sustancias bioquímicas, usos medicinales de flora y fauna.	Recursos para artesanías, joyas, mascotas, adoración, decoración y recuerdos.
<i>Funciones de información</i>	Recursos ornamentales	Variedad de la biota en los ecosistemas naturales con potencial de uso ornamental.	Disfrute del paisaje.
	Recursos estéticos	Características del paisaje.	Viaje a los ecosistemas naturales para ecoturismo, deporte al aire libre, etc.
	Recreación	Espacios naturales con potencial de uso recreativo.	El uso de la naturaleza como inspiración o motivación en libros, cine, pintura, símbolos nacionales, arquitectura, publicidad, etc.
	Enriquecimiento cultural y artístico	Variedad en las características naturales con valor cultural y artístico.	El uso de la naturaleza con fines religiosos o históricos.
	Enriquecimiento histórico y espiritual	Variedad en las características naturales con valor histórico y espiritual.	Uso de los sistemas naturales para la investigación científica.
	Desarrollo cognitivo: ciencia y educación	Variedad en la naturaleza con valor científico y educativo.	

Fuente: De Groot et al. (2002)

La Evaluación de Ecosistemas del Milenio realiza una clasificación para integrar la sustentabilidad ecológica, la conservación y el bienestar humano (Leemans & De Groot, 2003). Esta clasificación incluye servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales (figura 1-6). La clasificación plantea a los servicios de soporte como fundamentales para la oferta de los demás servicios ecosistémicos. Asimismo, los servicios de aprovisionamiento son aquellos productos obtenidos del ecosistema, mientras que los servicios de regulación son los beneficios obtenidos por el mantenimiento de procesos ecosistémicos. Finalmente, los servicios culturales hacen referencia a los beneficios no materiales que la sociedad obtiene de los ecosistemas (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012).

Figura 1-6. Clasificación de los servicios ecosistémicos MEA



Fuente: Camacho-Valdez y Ruiz-Luna (2012)

Leemans & De Groot (2003) resaltan que todos los servicios ecosistémicos presentan un valor, aunque no a todos se les ha asignado un precio. Por tanto, la transformación de ambientes naturales puede tener un costo total que supera los beneficios obtenidos, además esta transformación puede ser irreversible. Al comparar lo planteado por De Groot et al. (2002) (tabla 1-1) y lo propuesto por la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, 2003) (figura 1-6) puede observarse que el primer postulado parte de los procesos y componentes del ecosistema para finalmente definir bienes y servicios, siendo una visión ecocéntrica. Por el contrario la clasificación de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (2003) parte de una visión antropocéntrica dando mayor énfasis en el bienestar de la sociedad (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012).

Asimismo, Wallace (2007) citado por Camacho-Valdez y Ruiz-Luna (2012, p. 10) considera que el sistema de clasificación de SE de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (2003) no diferencia entre los procesos (medios) para obtener los SE de los propios SE (propósito). Los procesos son incluidos dentro de la misma categoría de clasificación, además presenta ambigüedad en definir términos como procesos del ecosistema, funciones y servicios.

Wallace (2007) por su parte, desarrolló un sistema de clasificación de SE en el que se pueden evaluar las consecuencias de la transformación de ecosistemas para el bienestar de la sociedad, permitiendo el análisis de alternativas en el manejo de los recursos para que su contribución al bienestar pueda ser de conservación y sustento. Wallace (2007) citado por Camacho-Valdez y Ruiz-Luna (2012, p. 11) propone cuatro categorías de valores humanos y su asociación con los servicios ecosistémicos. La clasificación propuesta se observa en la figura 1-7.

Figura 1-7. Clasificación de SE y categorías de valores humanos



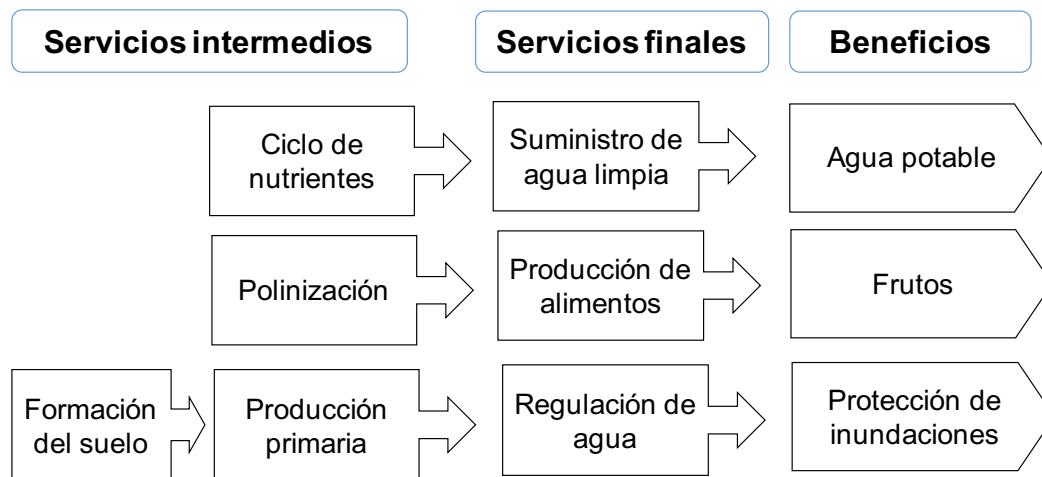
Fuente: Camacho-Valdez y Ruiz-Luna (2012)

Dentro de las clasificaciones más recientes está la propuesta por Turner, Georgiou y Fisher (2008) citados por Camacho-Valdez y Ruiz-Luna (2012, p. 12). Esta clasificación divide los SE en servicios intermedios y servicios finales. En la clasificación los servicios intermedios (formación del suelo, ciclo de nutrientes, polinización, producción primaria) generan los servicios finales (suministro de agua limpia, producción de alimento, regulación de agua) que están directamente relacionados con el bienestar humano. Además, esta clasificación simplifica la complejidad de los ecosistemas al especificar los servicios finales y los beneficios que generan. Al establecerse una conexión entre los procesos del ecosistema (servicios intermedios) y los servicios finales, es posible definir qué beneficios son importantes para el bienestar de la sociedad y por tanto apropiados y significativos para ser usados en estudios de valoración económica (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012). La clasificación propuesta por Turner et al. (2008) citado por Camacho-Valdez y Ruiz-Luna (2012, p. 12) se observa en la figura 1-8.

Tanto las clasificaciones propuestas por De Groot et al. (2002), evaluación de ecosistemas del milenio (2003), Leemans y De Groot (2003), Wallace (2007) y Turner et al. (2008), concuerdan en su carácter antropocéntrico, en otras palabras, los beneficios de los SE son para la humanidad. Sin embargo, plantean que es necesario contar con indicadores del estado de salud de los ecosistemas con propósitos de conservación y manejo. Uno de los indicadores es el asociado a la valoración de los SE, independientemente del valor intrínseco de existencia que se tiene para la naturaleza (Camacho-Valdez & Ruiz-Luna, 2012). Es importante resaltar que los SE son biofísicos en su origen ya que se derivan de funciones y procesos del ecosistema, los cuales son alterados en diferentes niveles por la acción humana. Por tanto, surge la necesidad de desarrollar metodologías de investigación que puedan entender los procesos biofísicos que mantienen y/o

alteran los ecosistemas y simultáneamente las funciones y la valoración social de los SE (La-Roca, 2010).

Figura 1-8. Clasificación SE intermedios y finales



Fuente: Turner et al. (2008) citado por Camacho-Valdez y Ruiz-Luna (2012, p. 12)

Derivado de las clasificaciones anteriormente descritas, se observa que autores como De Groot et al. (2002) plantean el concepto de funciones ecosistémicas y otros autores como Costanza y Folke (1997) introducen bienes y servicios. Fisher et al. (2009) hablan de procesos ecosistémicos, Turner et al. (2008) hablan de servicios intermedios y servicios finales (procesos y estructura del ecosistema). Es necesario definir los conceptos identificados en las clasificaciones de SE planteadas por los diferentes autores con el fin de reforzar su comprensión.

- Procesos ecosistémicos: transferencia de materia y flujos de energía dentro del ecosistema (Laterra, Castellarini & Orúe, 2011).
- Funciones ecosistémicas (FE): procesos ecosistémicos que contribuyen a la provisión de beneficios de los ecosistemas a la sociedad o “servicios ecosistémicos” (Laterra et al., 2011).
- Servicios ecosistémicos (SE): bienes y servicios derivados de las funciones de los ecosistemas que directa o indirectamente benefician a la población humana (Costanza & Folke, 1997).
- Bienes: objetos físicos tangibles (alimentos, madera, agua) derivados de los ecosistemas que benefician directamente al ser humano (Costanza & Folke, 1997).
- Servicios: procesos intangibles (regulación de ciclos minerales, regulación del clima, regulación del ciclo del agua) derivados de los ecosistemas que benefician directamente al ser humano (Costanza & Folke, 1997).

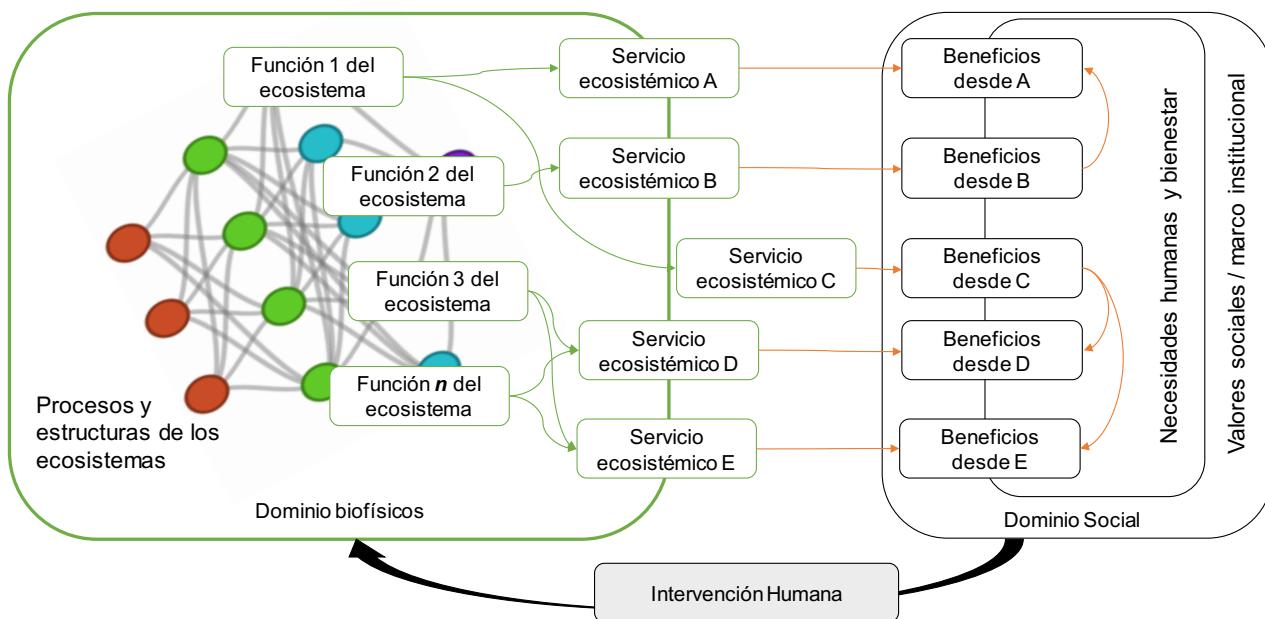
De las definiciones anteriormente planteadas, se puede establecer que los procesos se derivan de la transferencia de materia y los flujos de energía dentro del ecosistema, procesos fundamentales para la generación de las funciones de regulación, hábitat, producción e información. Los procesos y funciones son llevados a cabo por los ecosistemas sin considerar la intervención humana. Sin embargo, cuando las funciones ecosistémicas generan bienes y/o servicios que benefician directa o indirectamente a la población humana, se consideran servicios ecosistémicos.

En definiciones recientes de SE se consideran las similaridades que pueden observarse entre los sistemas sociales y los ecosistemas. Por ejemplo, la complejidad y la capacidad de adaptación que tienen ambos sistemas, también las propiedades comunes como la autoorganización, la diversidad de subsistemas, la adaptabilidad, la “no linealidad”, la estructura de sistemas jerárquicos y su relación con el contexto (La-Roca, 2010).

Basado en lo anterior, es posible proponer la evaluación biofísica de los servicios ecosistémicos integrada con su valor social. Laterra et al. (2011) define el valor social como las estimaciones no necesariamente monetarias, de la importancia relativa de distintos beneficios derivados del funcionamiento de los ecosistemas para las sociedades humanas. En la figura 1-9 se establece la representación conceptual de los servicios ecosistémicos en relación con los dominios biofísico y social, propuesta de Fisher et al. (2009) citado por La-Roca (2010, p. 4). En esta propuesta los SE sirven de puente conceptual entre las funciones del ecosistema y los beneficios percibidos por la sociedad para satisfacer sus necesidades, por lo cual se le asigna un valor social. Siendo así, los SE tienen una facultad dual, desde lo ecosistémico y lo social, y por ende su análisis debe trascender de lo disciplinar a lo transdisciplinario.

En la figura 1-9 se aprecia cómo los ecosistemas presentan procesos y estructuras que no requieren la intervención humana para su funcionamiento y que son definidos por las características biofísicas a nivel local. Una vez existe interferencia humana sobre los ecosistemas transformándolos hacia sistemas productivos, la sociedad obtiene directa o indirectamente beneficios derivados de las funciones específicas del ecosistema, llamados servicios ecosistémicos, los cuales satisfacen las necesidades humanas generando diversos niveles de bienestar.

Figura 1-9. Representación conceptual de SE en los dominios biofísico y social



Fuente: Fisher et al. (2009) citado por La-Roca (2010, p. 4)

Es de resaltar que el origen de los SE es biofísico al derivarse de funciones y procesos de los ecosistemas y cobran “valor” al generar bienestar a la sociedad. Los SE no pueden ser estudiados separando los aspectos biofísicos de los aspectos sociales, ya que por una parte los aspectos biofísicos condicionan los ecosistemas y los SE generados, y por otra parte la sociedad otorga

una valoración a estos servicios. En la valoración de los SE realizada por la sociedad es común otorgar valor a los SE que son fáciles de percibir, como los servicios de provisión de agua, alimentos y energía. Sin embargo, es difícil otorgar valor a los SE derivados de funciones de regulación, hábitat e información, ya que son SE generalmente inmateriales.

Un modelo de valoración de SE debe incluir entonces su complejidad como objeto de estudio, mediante estrategias de investigación de carácter transdisciplinar que incluyan su valoración ecológica y social, según las características específicas de las comunidades y culturas beneficiadas. La valoración monetaria de los SE genera una visión reducida de su complejidad, además de contribuir irremediablemente a la pérdida constante de los SE no monetizados. En este sentido la valoración social cobra vital importancia para garantizar la permanencia en el tiempo y provisión de los diferentes SE.

1.1.3.1 Servicios ecosistémicos en agroecosistemas sostenibles

El desarrollo del proyecto de Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) generó un gran impulso para que los servicios ecosistémicos se trasformaran en un campo importante de investigación, generando múltiples trabajos relacionados con el estudio de los ecosistemas y con la valoración de los servicios proporcionados (Sánchez & Muñoz, 2016). Estos estudios son de gran utilidad para el diseño de políticas, la definición de medidas de conservación, y la asignación de presupuestos por parte de las instituciones encargadas del manejo de los ecosistemas (Sánchez & Muñoz, 2016).

Por otra parte, existe el interés de estudiar los servicios ecosistémicos que son provistos por los agroecosistemas y las interacciones con los ecosistemas circundantes. Las interacciones caracterizan y diferencian a los agroecosistemas del resto de ecosistemas, rasgo de gran importancia para valorar los SE, los cuales están asociados tradicionalmente al SE de aprovisionamiento de alimentos, ignorando los demás tipos de SE provistos. Igualmente son escasamente analizadas las relaciones entre los SE y los agroecosistemas. Al respecto Dale y Polasky (2007) proponen tres tipos de relaciones: la primera es que los agroecosistemas generan SE, el más evidente es la producción de alimentos, la segunda relación es que los agroecosistemas se benefician de los SE de los ecosistemas naturales. Finalmente, la tercera relación estaría dada por los efectos que tienen las prácticas agrícolas realizadas en los agroecosistemas sobre los ecosistemas naturales.

Considerando las relaciones mencionadas por Dale y Polasky (2007) se debe potenciar la generación de SE en agroecosistemas y reducir los posibles efectos sobre los ecosistemas no agrícolas. En este sentido Altieri (2002) plantea la necesidad de aumentar la biodiversidad de los agroecosistemas mediante la implementación de prácticas agrícolas como rotaciones de cultivos, implementación de policultivos, implementación de sistemas agroforestales, cultivos de cobertura e integración de animales en el agroecosistema. A manera de ejemplo sobre la relevancia de la biodiversidad en los agroecosistemas, Sánchez, Sánchez-Cárdenas y Sánchez de lón (2015) señalan cómo en predios encuestados en Tuluá (Valle del Cauca, Colombia), los campesinos identifican la importancia de sus agroecosistemas como hábitat para especies vegetales silvestres y animales especialmente mamíferos y aves.

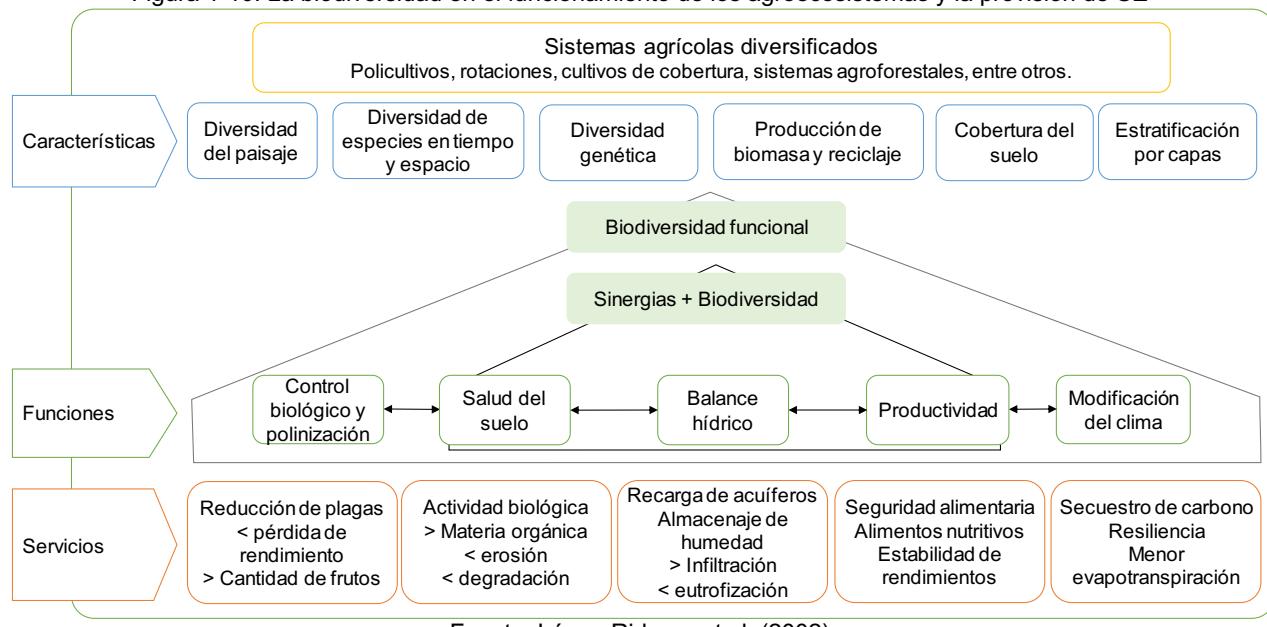
Las prácticas agrícolas planteadas por Altieri (2002) para aumentar la biodiversidad propenden por que el agroecosistema sea sostenible. El agroecosistema como un sistema complejo, imita la estructura y funciones de los ecosistemas naturales a nivel local. Al integrar una alta diversidad de especies en el agroecosistema, se cuenta con un alto nivel de interacciones y sinergismos entre

sus componentes bióticos y abióticos, interacciones que proveen los mecanismos para que los sistemas subsidien la fertilidad de su propio suelo, la productividad y la protección de los cultivos.

Altieri et al. (2012) resaltan que la biodiversidad y los servicios ecosistémicos derivados de las interacciones ecológicas benéficas entre los cultivos, animales y suelos, se constituyen en uno de los atributos básicos de un agroecosistema sostenible. La regulación de las funciones en un agroecosistema depende del nivel de biodiversidad entre plantas, animales y su ambiente. La biodiversidad en los agroecosistemas provee SE como el control biológico, al utilizar sistemas diversos como policultivos, sistemas agroforestales y cultivos de cobertura, se mejoran las poblaciones de insectos benéficos que controlan las poblaciones de insectos no deseables a través de la depredación, el parasitoidismo y la competencia (Altieri & Nicholls, 2004).

Otros SE identificados por Altieri et al. (2012), Martín y Osorio (2012), Gutiérrez, Suárez y Vidal-Abarca (2016) son la polinización, el balance hídrico y la regulación del microclima. SE que a su vez contribuyen a la reducción de plagas dentro del agroecosistema. Las especies plantadas se constituyen en hábitats para la hibernación y alimentación de variedad de insectos enemigos naturales de insectos indeseables. Un mayor rendimiento de las cosechas, aumenta la materia orgánica y la actividad biológica en el suelo, mejora la seguridad alimentaria y la detoxificación de elementos nocivos. La importancia de la biodiversidad en el funcionamiento de los agroecosistemas y la provisión de servicios ecosistémicos es presentada gráficamente en la figura 1-10.

Figura 1-10. La biodiversidad en el funcionamiento de los agroecosistemas y la provisión de SE



Paralelamente, Beer et al. (2003), Moonen y Barberi (2008), Sayago (2016) describen que dentro de los SE que provee un agroecosistema sostenible se encuentran: el mantenimiento de la fertilidad del suelo, la conservación del agua, el almacenamiento de carbono, la provisión de productos primarios como madera y productos secundarios como leña, resinas y frutos.

Así mismo, Machado, Nicholls, Márquez y Turbay (2015) resaltan además que, en agroecosistemas con componente forestal, se generan SE como el aporte de materia orgánica, la

fijación de nitrógeno al suelo, la regulación del microclima, la generación de refugio y hábitat para aves y plantas, la polinización, el control de la erosión y la captura de carbono.

De Schutter (2010), Hoffmann y Oetting (2010) afirman que al reducir la dependencia de insumos energéticos externos, principalmente derivados de combustibles fósiles, los agroecosistemas sostenibles promueven SE que mitigan el cambio climático, al minimizar las emisiones de dióxido de carbono y al incorporar en mayores cantidades materia orgánica y biomasa al suelo que cumplen la función de sumideros de carbono.

Aunado a los SE referenciados anteriormente, Rositano y Ferraro (2014) realizaron una verificación de servicios provistos por agroecosistemas identificados en artículos científicos, encontrando servicios como ciclado de nutrientes, mantenimiento de la información biológica y genética, polinización, dispersión de semillas, capacidad de carga ecológica, incorporación de residuos animales y servicios culturales como belleza estética y recreación (turismo rural). Rositano y Ferraro (2014) realizaron la clasificación por procesos y escala espacial de los servicios provistos por los agroecosistemas. Clasificación compilada en la tabla 1-3.

Tabla 1-3. Procesos y escala de los SE en agroecosistemas

Servicios	Procesos	Escala espacial		
		Local	Regional	Global
Servicios de soporte	Balance de N	x	x	X
	Balance de P	x	x	
	Balance de S	x	x	
	Balance de K	x	x	
	Balance de C	x	x	X
	Conservación del agua	Control de la contaminación del agua	x	x
		Mantenimiento de la fertilidad	x	
		Mantenimiento de la estructura	x	
	Conservación del suelos	Prevención de daños por erosión	x	
		Incorporación de desperdicios	x	
Servicios de provisión	Control de la contaminación del suelo	x	x	
	Mantenimiento de la biodiversidad de microorganismos	x	x	
	Provisión de alimentos	Producción vegetal	x	x
	Provisión de agua			x
	Provisión de combustibles y energía	Producción vegetal	x	x
Servicios de regulación	Atmosférica	Mantenimiento de la calidad del aire	x	X
	Adversidades bióticas	Mitigación de pestes	x	x
	Disturbios / anomalías	Balance agua	x	x
		Control de incendios	x	x
Mantenimiento de la biodiversidad	Germoplasma		x	x

Fuente: Rositano y Ferraro (2014)

A manera de síntesis, y recopilando el planteamiento de autores como Altieri y Nicholls (2000); Martínez (2002); Altieri (2002); Beer et al. (2003); Gillison, Liswanti, Budidarsono, Van Noordwijk y Tomich (2004); Altieri y Nicholls (2007); Khalajabadi (2008); Moonen y Barberi (2008); De Schutter (2010); Hoffmann y Oetting (2010); Power (2010); Martín y Osorio (2012); De Souza et

al. (2012); Cerdán, Rebolledo, Soto, Rapidel y Sinclair (2012); Bacon, Getz, Kraus, Montenegro y Holland (2012); Rositano y Ferraro (2014); Machado et al. (2015); Rositano (2015); Pérez, González y Muñoz (2015); Nicholls, Altieri y Vázquez (2015); Sayago (2016); Gutiérrez et al. (2016); Sánchez y Muñoz (2016); Vargas y Osorio (2016); Winkler y Nicholas (2016); Hoffmann (2017); Nicholls, Henao y Altieri (2017); Swagemakers, Domínguez, Onofa, Oostindie y Groot (2017); Güldner y Krausmann (2017); Garbach y Morgan (2017); Daniels et al. (2017) se identifican servicios ecosistémicos en agroecosistemas asociados a las funciones de regulación, hábitat, producción e información. En la tabla 1-4 se recopilan las funciones y los SE en agroecosistemas sostenibles.

Tabla 1-4. Servicios ecosistémicos en agroecosistemas sostenibles

Funciones	Servicios ecosistémicos	Bibliografía
Regulación de gases	Rg-1: reducción de emisiones de dióxido de carbono. Rg-2: almacenamiento de materia orgánica y biomasa al suelo. Rg-3: almacenamiento de carbono en especies arbóreas del agroecosistema.	(Beer et al., 2003); (Gillison et al., 2004); (Moonen & Barberi, 2008); (Khalajabadi, 2008); (Lal, 2009); (De Schutter, 2010); (Hoffmann & Oetting, 2010); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Tsonkova, Quinkenstein, Böhm, Freese & Schaller, 2014); (Machado et al., 2015); (Sayago, 2016); (Gutiérrez et al., 2016); (Hossain, Eigenbrod, Amoako & Dearing, 2017).
Regulación del clima	Rc-4: control de humedad, radiación y vientos. Rc-5: generación de condiciones microclimáticas favorables para especies animales y vegetales dentro del agroecosistema.	(Altieri & Nicholls, 2000); (Gillison et al., 2004); (Khalajabadi, 2008); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Machado et al., 2015); (Nicholls et al., 2015) (Gutiérrez et al., 2016).
Funciones de regulación	Rpa-6: aumento de la resiliencia del agroecosistema. Rpa-7: adaptación a condiciones cambiantes.	(Altieri, 2002), (Harris, 2003); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Pérez et al., 2015); (Nicholls et al., 2015); (Nicholls et al., 2017).
Regulación hídrica	Rh-8: ciclo hidrológico Rh-9: drenaje y riego natural. Rh-10: conservación de la humedad del suelo. Rh-11: conservación del suelo productivo. Rh-12: recarga de acuíferos.	(Beer et al., 2003); (Gillison et al., 2004); (Moonen & Barberi, 2008); (Altieri et al., 2012); (Martín & Osorio, 2012); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Nicholls et al., 2015); (Sayago, 2016); (Gutiérrez et al., 2016).
Abastecimiento de agua	Raa-13: disponibilidad de agua para riego y consumo.	(Khalajabadi, 2008); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Machado et al., 2015); (Pérez et al., 2015); (Gutiérrez et al., 2016).
Retención de suelo	Rrs-14: mantenimiento de las tierras cultivables. Rrs-15: prevención de daños por la erosión y la sedimentación.	(Khalajabadi, 2008); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Machado et al., 2015); (Pérez et al., 2015); (Gutiérrez et al., 2016).

Funciones	Servicios ecosistémicos	Bibliografía	
Formación de suelo y regulación de nutrientes	Rfs-16: mantenimiento de la productividad en las tierras de cultivo. Rfs-17: producción y movilización de nutrientes (micorrizas, fijación de nitrógeno, etc.). Rfs-18: provisión de cobertura para conservación de suelo y agua. Rfs-19: promoción de la biología del suelo por adición de materia orgánica y excreciones radiculares. Rfs-20: detoxificación de elementos nocivos.	(Altieri, 2002); (Beer et al., 2003); (Gillison et al., 2004); (Khalajabadi, 2008); (Moonen & Barberi, 2008); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Altieri et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Machado et al., 2015), (Pérez et al., 2015); (Nicholls et al., 2015); (Sayago, 2016); (Gutiérrez et al., 2016); (Nicholls et al., 2017); (Güldner & Krausmann, 2017).	
Asimilación de residuos	Rar-21: incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía. Rar-22: control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos.	(Altieri, 2002); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014).	
Polinización	Rp-23: presencia de insectos mejorando la polinización de los cultivos.	(Gillison et al., 2004); (Altieri et al., 2012), (Martín & Osorio 2012), (Khalajabadi, 2008), (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Machado et al., 2015); (Pérez et al., 2015); (Nicholls et al., 2015); (Gutiérrez et al., 2016); (Garbach & Morgan, 2017).	
Control biológico	Rcb-24: reducción de daños a los cultivos por plagas. Rcb-25: generación de hábitats para variedad de insectos benéficos, enemigos naturales de insectos indeseables. Rcb-26: control de poblaciones de insectos plaga a través de depredación, parasitoidismo y competencia. Rcb-27: producción de sustancias químicas para estimular componentes deseados y suprimir componentes indeseables (sustancias alelo-químicas, repelentes, etc.).	(Altieri, 2002); (Altieri & Nicholls, 2004); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Altieri et al., 2012); (Martín & Osorio, 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Pérez et al., 2015); (Nicholls et al., 2015); (Gutiérrez et al., 2016); (Nicholls et al., 2017); (Daniels et al., 2017).	
Funciones de hábitat	Habitat	Hab-28: mantenimiento de las condiciones ideales para especies animales o vegetales dentro del agroecosistema. Hab-29: generación de condiciones para refugio, alimentación y sitio de reproducción.	(Altieri, 2002); (Khalajabadi, 2008); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Machado et al., 2015); (Sánchez & Villegas, 2015); (Pérez et al., 2015); (Gutiérrez et al., 2016); (Vargas & Osorio, 2016); (Nicholls et al., 2017); (Swagemakers et al., 2017).
	Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb-30: conservación de material genético.	

Funciones	Servicios ecosistémicos	Bibliografía
	Hmdb-31: existencia de una variedad de especies que interactúan dentro y fuera del agroecosistema.	
Alimentos	Pa-32: provisión de alimentos para consumo humano. Pa-33: producción de forrajes y alimentos para animales. Pa-34: producción de carne y derivados animales (lácteos, huevos) para consumo humano.	(Dale & Polasky, 2007); (Power, 2010); (Altieri et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Martín & Osorio, 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Gutiérrez et al., 2016); (Nicholls et al., 2017); (Swagemakers et al., 2017).
Funciones de producción	Materias primas <p>Pmp-35: producción de materia prima para construcción, manufactura, procesamiento.</p> <p>Pmp-36: generación de productos secundarios como leña, resinas y frutos.</p> <p>Pmp-37: producción de combustibles y energía.</p> <p>Pmp-38: producción de abonos verdes.</p> <p>Pmp-39: producción de fertilizantes.</p>	(Altieri, 2002); (Beer et al., 2003); (Moonen & Barberi, 2008); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Sayago, 2016); (Gutiérrez et al., 2016); (Nicholls et al., 2017).
	Recursos genéticos <p>Pps-40: provisión de semillas o especies locales adaptadas.</p>	(Altieri, 2002); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Gutiérrez et al., 2016).
	Recursos medicinales <p>Prm-41: plantas utilizadas para preparación de medicinas.</p>	(Altieri, 2002); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Gutiérrez et al., 2016).
	Recursos ornamentales <p>Pro-42: plantas o árboles con potencial de uso ornamental.</p>	(Altieri, 2002); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014).
	Recursos estéticos <p>Ire-43: disfrute del paisaje.</p> <p>Ire-44: generación de actividades conexas (turismo rural).</p>	(Altieri, 2002); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Pérez et al., 2015); (Gutiérrez et al., 2016); (Winkler & Nicholas, 2016); (Swagemakers et al., 2017).
Funciones de información	Recreación <p>Ir-45: generación de actividades recreativas para la comunidad local.</p>	(Altieri, 2002); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Rositano & Ferraro, 2014); (Pérez et al., 2015); (Gutiérrez et al., 2016); (Winkler & Nicholas, 2016); (Swagemakers et al., 2017).
	Enriquecimiento cultural y artístico <p>Ieca-46: generación y conservación de tradiciones y costumbres.</p>	(Martínez, 2002); (Gillison et al., 2004); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Sánchez & Muñoz, 2016); (Winkler & Nicholas, 2016); (Nicholls et al., 2017).
	Enriquecimiento histórico y espiritual <p>Lehe-47: conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales.</p> <p>Lehe-48: uso de especies con fines religiosos, espirituales o históricos.</p>	(Martínez, 2002); (Gillison et al., 2004); (De Souza et al., 2012); (Cerdán et al., 2012); (Bacon et al., 2012); (Sánchez & Muñoz, 2016); (Winkler & Nicholas, 2016); (Nicholls et al., 2017).
	Desarrollo cognitivo: ciencia y educación <p>Idce-49: generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos.</p>	(Gillison et al., 2004); (Bacon et al., 2012); (Pérez et al., 2015); (Winkler & Nicholas, 2016); (Hoffmann, 2017).

Fuente: autor (2018) basado en bibliografía citada adaptado de De Groot et al.(2002)

En la tabla 1-4, se realiza la clasificación de SE en AS bajo las siguientes consideraciones:

1. La clasificación de SE realizada por MEA (2005) y otras clasificaciones como IPBES (2012) incluye servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales. Estas clasificaciones dan un mayor énfasis al bienestar que obtiene la sociedad de los ecosistemas (visión antropocéntrica), definiendo los SE de forma general ej: alimentos, agua, leña, fibra, bioquímicos, recursos genéticos. Por otra parte, la clasificación realizada por De Groot et al. (2002) parte de los procesos y componentes del ecosistema para finalmente definir bienes y servicios (visión ecocéntrica). La clasificación incluye funciones de regulación, hábitat, producción e información, incluyendo una segunda clasificación de funciones y procesos asociados de los cuales de derivan los SE finalmente estipulados. Ej: mantenimiento de la productividad en las tierras de cultivo, aumento de la resistencia de cultivos ante patógenos y plagas, suministro de agua para consumo humano y riego. El enfoque de la clasificación de SE realizada por De Groot et al. (2002) permite una mayor comprensión de las funciones y los SE derivados.
2. La clasificación realizada por De Groot et al. (2002) especifica las funciones de regulación, hábitat, producción e información) y define de manera puntual los SE derivados. Funciones de regulación: regulación de gases, regulación del clima, prevención de alteraciones, regulación del agua, abastecimiento de agua, retención del suelo, formación del suelo, regulación de nutrientes, asimilación de residuos, polinización y control biológico. Funciones de hábitat: hábitat y mantenimiento de la diversidad biológica. Funciones de producción: alimentos, materias primas, recursos genéticos, recursos medicinales y recursos ornamentales. Funciones de información: recursos estéticos, recreación, enriquecimiento cultural y artístico, enriquecimiento histórico y espiritual y desarrollo cognitivo ciencia y educación. Condición que permite realizar una mejor identificación del SE a valorar en un agroecosistema sostenible.
3. Desde una visión productivista el agroecosistema se define como “cualquier tipo de ecosistema modificado y gestionado por los seres humanos con el objetivo de obtener alimentos, fibras y otros materiales de origen biótico” (Salas, Labrador & Altieri, 2001). Sin embargo, la definición de agroecosistema sostenible propuesta por esta investigación incorpora el valor multidimensional de los SE, entendido como la capacidad del AS de generar diferentes tipos de productos y servicios en las dimensiones ecológica, sociocultural, tecnológica, económica y política. Desde la dimensión del valor ecológico se valoran en mayor medida las funciones de regulación y hábitat. Desde la dimensión del valor sociocultural se valoran con mayor énfasis las funciones de producción e información. En la dimensión económica se resaltan las funciones de producción y regulación. En la dimensión del valor tecnológico se valoran directamente las funciones de información y finalmente, en la dimensión política se valoran las funciones de regulación, hábitat, producción e información. La clasificación realizada por De Groot et al. (2002) al especificar las funciones de producción, hábitat, producción e información y los SE derivados, es compatible en mayor medida con el objeto de la presente investigación: la valoración de SE en agroecosistemas sostenibles desde las 5 dimensiones del valor propuestas.
4. Los SE en agroecosistemas identificados mediante la revisión de literatura se adaptan y clasifican de una manera más fluida y lógica en el trabajo realizado por De Groot et al. (2002). Por otra parte, la clasificación presentada en la tabla 1-4 especifica un total de 49 servicios ecosistémicos en agroecosistemas sostenibles, incluyendo SE no identificados por De Groot et al. (2002) como es el caso de los SE de información: Ir-44: generación de actividades conexas (turismo rural), Ir-45: generación de actividades recreativas para la

comunidad local, leca-46: generación y conservación de tradiciones y costumbres, lehe-47: conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales, lehe-48: uso de especies con fines religiosos, espirituales o históricos, Idce-49: generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos, entre otros.

1.2 Aproximaciones teóricas

A continuación, se analizan las bases teóricas que, desde la agroecología y la economía ecológica, permiten el abordaje de la valoración de SE en agroecosistemas. Se examina la teoría de sistemas, la teoría de la sostenibilidad fuerte y la teoría del valor, identificando las dimensiones del valor y los enfoques de valoración de servicios ecosistémicos en agroecosistemas.

1.2.1 Teoría de sistemas

La pérdida o deterioro de los SE en el contexto de los agroecosistemas está mediada por dinámicas en niveles locales, regionales, nacionales y globales. En lo local, las percepciones, los hábitos, las prácticas, los conocimientos, las tecnologías, entre muchos otros rasgos, de los seres humanos que habitan estos espacios. En lo regional y nacional se encuentran las políticas agrarias, las normas ambientales, las dinámicas de los mercados y los usos de la tierra, aspectos que afectan las formas de producción agrícola y la provisión de los SE. En lo global, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y ecosistemas, la contaminación de recursos como el agua y el aire, afectan la capacidad de los agroecosistemas para mantener las funciones y los SE que proveen (UNEP, 2000).

La comprensión de las dinámicas locales, regionales, nacionales, globales y sus interrelaciones, ponen de manifiesto la necesidad de incorporar la teoría de sistemas y los sistemas complejos a los estudios realizados sobre los agroecosistemas. La agroecología y la economía ecológica aportan aproximaciones conceptuales que permiten a los investigadores ir más allá de los componentes del sistema y moverse hacia las interdependencias entre las ciencias (Casanova et al., 2016).

La teoría general de sistemas plantea analizar la realidad como un “todo”, ya que los resultados son distintos y mayores a la suma del análisis de sus partes (Johansen, 1975). De igual manera, esta teoría aporta los fundamentos necesarios para la creación y descripción de sistemas, tanto naturales como artificiales, aporta herramientas para su análisis, determina cómo se constituyen, funcionan, estructuran y se enfocan los sistemas, enfatizando que esta teoría es aplicable en cualquier campo de estudio (Johansen, 1975).

Bertalanffy (1992) planteó que la teoría general de sistemas permite describir que existen modelos, principios y leyes que se aplican a sistemas generalizados o a sus subsistemas, indistintamente de su condición particular, de la naturaleza de sus elementos, de sus componentes y de las relaciones entre éstos. La teoría general de sistemas TGS, se constituye como un área lógico-matemática cuyo campo es la formulación y derivación de estos modelos, principios y leyes que son aplicables a los sistemas en general (Bertalanffy, 1992).

Derivada de la teoría general de sistemas, se encuentra la teoría de sistemas. Le Moigne (1990) la define como el estudio transdisciplinario de los fenómenos que investiga los principios comunes a todas las entidades complejas y los modelos que pueden utilizarse para describirlos. Malagón y Prager (2001) especifican que la teoría de sistemas integra diversas disciplinas en el estudio de una situación en particular, considerando en su análisis aspectos biofísicos, socioculturales y

económicos, cómo es el caso de los sistemas productivos agrícolas. Sin embargo, tanto la investigación desde la agroecología como la investigación desde la economía ecológica reconocen que se debe avanzar desde el estudio de la interdependencia y la autoorganización, hacia la investigación sistemática compleja que aporta herramientas que permiten la comprensión de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza, en lo global y lo local, lo espacial y lo temporal. Así, la teoría de sistemas permite estudiar al agroecosistema como un sistema complejo con elementos heterogéneos e interrelacionados (Casanova et al., 2016).

La agroecología implementa la teoría de sistemas al analizar los ciclos minerales, las transformaciones de energía, los procesos biológicos y las relaciones socioeconómicas en el agroecosistema (Altieri & Nicholls, 2000). También al estudiar “la estructura y función de los agroecosistemas, tanto desde el punto de vista de sus relaciones ecológicas como culturales” (León, 2009, p. 41). Asimismo, la economía ecológica (EE) adopta la teoría de sistemas para el estudio de los agroecosistemas como parte del sistema económico y, por tanto, como un subsistema de la ecósfera, definida como “el conjunto de operaciones que se despliegan sobre todo el planeta y por medio de las cuales reciclan la materia y fluye la energía que alimenta la vida” (Gómez, Vargas & Posada, 2007). La EE reconoce que el agroecosistema está limitado a las restricciones biofísicas que imponen los ecosistemas, fuente de los bienes y servicios que soportan la producción agrícola (Goodland & Daly, 1996).

1.2.1.1 Agroecosistemas como sistemas complejos

Los sistemas se comportan como un todo, presentando leyes propias. Al quitar un componente o reemplazarlo por otro diferente, el comportamiento cambia apreciablemente, los sistemas se caracterizan por la presencia de bucles de retroalimentación y la aparición de propiedades emergentes (Johansen, 1975; Le Moigne, 1990; Rozo & da Luz Reis, 2003). Un sistema es un conjunto de elementos u objetos que presentan influencias o efectos entre sí dentro de un ambiente y forma un patrón más grande que es diferente a cualquiera de sus partes (Le Moigne, 1990). Autores como Altieri (2002) señalan que un agroecosistema puede ser visto como un sistema, en el que se llevan a cabo diversos procesos ecológicos que interactúan con condiciones socioculturales y económicas.

Existen sistemas en los cuales se identifican características que permiten considerarlo como un sistema complejo. Según Vicsek (2002) y Gilbert (2004) citados por Izquierdo, Ordax, Santos y Martínez (2008, p. 91) algunas de las características son:

- Los componentes de niveles jerárquicos inferiores suelen mostrar un grado de autonomía significativo.
- El comportamiento del sistema surge a partir de la autoorganización de sus componentes, sin que esta organización esté controlada ni dirigida por ningún ente exterior al sistema.
- Los componentes básicos de estos sistemas complejos (células, hormigas, individuos, poblaciones, entre otros) perciben su entorno y responden a cambios en él de forma potencialmente diferente.
- Los sistemas complejos presentan una capacidad de adaptación, definida como la capacidad de evolución en el tiempo de los componentes básicos del sistema en respuesta a cambios del entorno mediante el aprendizaje, selección y/o remplazo.
- Los sistemas complejos se caracterizan por su naturaleza descentralizada, la presencia de ciclos de causalidad (bucles) y su naturaleza no lineal (Izquierdo et al., 2008).

La teoría de sistemas y los sistemas complejos se constituyen como bases de la agroecología y la EE para estudiar los agroecosistemas (Viveros, 2007). Altieri (2002) considera a los

agroecosistemas como sistemas complejos, ya que las interacciones ecológicas y los sinergismos entre sus componentes biológicos proveen los mecanismos para que mantengan su capacidad de adaptación, evolucionando en el tiempo como respuesta a cambios del entorno mediante el aprendizaje, selección y/o remplazo). Asimismo, los agroecosistemas como sistemas complejos se caracterizan por la naturaleza descentralizada de sus componentes, tanto los ingresados por el ser humano (maquinaria, fertilizantes, semillas, agua de irrigación y trabajo) como los componentes externos naturales (radiación solar, lluvia, viento, sedimentos, nutrientes y energía) (Gliessman, 2002). De igual modo, Altieri y Nicholls (2010) subrayan que al ser un agroecosistema un sistema complejo y diversificado, aumenta su estabilidad, la fertilidad de su propio suelo, la productividad y la protección, permitiendo que los cultivos alcancen niveles aceptables de productividad incluso en condiciones de stress ambiental.

1.2.2 Teoría de la sostenibilidad fuerte

En el concepto de agroecosistema sostenible se plantean los cuatro macroaspectos de sostenibilidad propuestos desde la agroecología. Este acercamiento conceptual es fortalecido desde la EE al introducir la teoría de la sostenibilidad fuerte. Sin pretender realizar una descripción exhaustiva de la teoría, desde el análisis del concepto de sostenibilidad ambiental y del análisis de los modelos de desarrollo económico realizados en el Informe Brundtland (1987), se plantearon diferentes discusiones que dieron origen a los conceptos de sostenibilidad fuerte y débil. Norton (1992) planteó que la sostenibilidad débil es una propuesta desde la racionalidad de la economía estándar, mientras que la sostenibilidad fuerte, fue formulada desde la racionalidad ecológica.

La sostenibilidad fuerte en términos de capital, quiere decir que el capital natural no es sustituible, ni remplazable, ni intercambiable por el capital financiero o el capital físico (Costanza & Patten, 1995; Gómez, Vargas & Posada, 2007; León, 2009). La sostenibilidad fuerte se constituye como la viabilidad del desarrollo económico preservando la capacidad de carga global del ecosistema para seguir siendo fuente de recursos y sumidero de residuos, manteniendo la complejidad y funcionamiento del ecosistema (Goodland, 1996). Autores como Costanza y Patten (1995) definen la sostenibilidad fuerte como "la viabilidad de la interacción compleja entre dos sistemas dinámicos, el socioeconómico y el ecosistema".

La teoría de la sostenibilidad fuerte es ampliamente trabajada desde la EE. Se basa en la termodinámica y la ecología, entendiendo la actividad económica como la utilización de los ecosistemas, donde los aspectos biofísicos y energéticos, como las leyes de la termodinámica, limitan la escala del desarrollo económico. Asimismo, esta teoría permite establecer el diseño y manejo de los agroecosistemas bajo los límites biofísicos y ecológicos de los ecosistemas, de manera que se garantice la permanencia de sus funciones, y como consecuencia, de los SE que estas funciones proveen (Gómez et al., 2007).

En la evaluación de sostenibilidad fuerte puede implementarse una perspectiva amplia desde las consideraciones de dimensiones, desde las cuales los tomadores de decisiones pueden observar un espectro más amplio del efecto del sistema económico sobre el sistema ecológico. Asociado a este tipo de evaluaciones, las dimensiones: social, económica y ecológica, son generalmente denominadas como "los tres pilares" de la sostenibilidad, o como Hacking y Guthrie (2008) lo llaman la "Triple línea base" (the triple bottom-line). Esta triada plantea un acercamiento importante sobre la teoría de la sostenibilidad fuerte, conocido como la multidimensionalidad de la evaluación de la sostenibilidad. A este planteamiento se han suscitado contribuciones desde la agroecología y los estudios de sistemas complejos, donde se incorporan dos dimensiones de evaluación, la política y la tecnológica.

En los agroecosistemas, la dimensión política permite estudiar la influencia de las políticas gubernamentales que influyen las condiciones económicas de mercados a través de subsidio, incentivos e impuestos. Asimismo, la incorporación de la dimensión tecnología, logra que en los análisis se considere el acervo de conocimientos tradicionales y científicos que permiten manejar los agroecosistemas para generar bienestar social (Musacchio & Grant, 2002; Diaz-Manrique, 2014; Bautista, Narváez, Camargo, Chery & Morel, 2016; Saarikoski et al., 2016; Espinoza, Camargo, Narváez & Alfaro, 2017).

1.2.3 Teoría del valor

El rol de la naturaleza como fundamento de la sostenibilidad del modelo económico y el hecho que el bienestar humano está supeditado al mantenimiento y la resiliencia de los ecosistemas que sostienen a la sociedad, aún no ha permeado los fundamentos conceptuales de la teoría económica dominante en la actualidad. Desde los fisiócratas del siglo XVII, se consideraba a la tierra como elemento físico y fuente de riqueza. Aspecto que se mantuvo hasta el siglo XIX, cuando se establece el concepto de capital, derivado de los factores trabajo y tierra que limitan la producción. Economistas clásicos de este periodo, como John Stuart Mill y el mismo Marx (1844), señalaron nuevamente a la tierra como fuente de riqueza física y de valor, siendo este factor del capital una representación de la naturaleza misma, reconociendo su carácter finito. Es con la teoría económica neoclásica de finales del siglo XIX y comienzos del XX que se observa la separación de los límites físicos de la economía, y se deja de lado a la naturaleza como fuente de valor (Gómez-Baggethun & De Groot, 2007).

En las cuatro primeras décadas del siglo XX, la humanidad estuvo sumida en un periodo de guerra, destrucción y caos que generó desarrollos científicos y tecnológicos para fines bélicos y de supervivencia. Pasado este periodo, se da la necesidad de reconstrucción de los países afectados, proceso liderado por los Estados Unidos, donde se gesta el concepto de desarrollo. Se resalta el discurso del presidente de los Estados Unidos Harry Truman (1949) que planteó la recuperación económica mundial como una prioridad, al igual que colocar los avances científicos y tecnológicos al servicio del crecimiento de las regiones subdesarrolladas. Estos planteamientos tuvieron una influencia profunda en el incremento de la producción de bienes manufacturados, la demanda de recursos naturales y la generación de residuos sólidos, líquidos y gaseosos.

En la década del 70, la degradación ambiental generada por más de tres décadas de transformación y uso de la naturaleza, derivó en eventos catastróficos como el derrame de metilmercurio, desde 1955 y durante más de una década, en la bahía de Minamata (Japón), el desastre de Seveso en 1976 en Milán (Italia) por emisiones de dioxinas provenientes de un planta química, y siete eventos asociados con derrames de petróleo en el mar, vertiendo más de un millón de toneladas de petróleo, en costas francesas, españolas, sudafricanas y mexicanas entre 1967 y 1979. También acontecimientos como la primera crisis del petróleo en 1973 que puso en evidencia las relaciones entre eventos políticos con la oferta de recursos naturales fundamentales para el crecimiento económico. Los eventos y catástrofes presionaron a la comunidad internacional a reflexionar (informe Meadows y conferencia de Estocolmo, entre otras) frente a la capacidad del modelo económico y de sus perspectivas analíticas, para afrontar los límites del crecimiento desde un planeta con recursos finitos, y de comprender las relaciones entre el deterioro ambiental y el bienestar de la sociedad.

Frente a las limitaciones del modelo económico actual, la EE se plantea como una ciencia que desarrolla un nuevo marco conceptual y metodológico que incorpora los costos físicos que está acarreando la naturaleza por la actividad económica, y sus implicaciones sobre las sociedades, y lenguajes alternativos del concepto del valor. A este respecto se destaca el aporte de Georgescue

Roegen (1996) en su trabajo sobre la ley de la entropía y el proceso económico, y Odum (1980, 1996) en sus artículos sobre la calidad de la energía, la emergía, la ecología y la economía. Analizando el valor energético, basado en la segunda ley de la termodinámica (la entropía) los materiales o servicios que presenten una baja entropía tendrán más valor energético que aquellos que hayan pasado por un proceso económico o de transformación tecnológica. Por ejemplo, el petróleo crudo es un material con baja entropía y por ende un alto valor energético, luego al transformarlo en combustibles líquidos mediante un proceso tecnológico, se invirtió una alta cantidad de energía, haciendo que el combustible sea de menor valor energético, aunque más útil para la sociedad que el petróleo crudo.

Desde la economía ecológica, se plantean puentes que permiten comprender las relaciones sociedad, economía y ecología, mediante conceptos como el capital natural y los servicios ecosistémicos, en los cuales se incorpora el rol de la naturaleza y los costos ecológicos derivados del crecimiento económico (Gómez-Bagethun & De Groot, 2007). La EE presenta una definición funcional del capital natural desde el cual se producen flujos de bienes o servicios que son valiosos para la sociedad, debido a su capacidad de suplir sus necesidades de bienestar actuales y futuras (Costanza & Daly, 1992; Segura & Aguilar, 2016). Igualmente, Costanza (1997) citado por La-Roca (2010, p. 3) establece que los SE constituyen un flujo generado por los ecosistemas, conocido como capital natural que contribuye directa o indirectamente al bienestar de la sociedad (La-Roca, 2010). Es así como el concepto de SE está relacionado con la dependencia, directa o indirecta que tiene el bienestar de los seres humanos de los ecosistemas.

La existencia de los SE está condicionada por las relaciones entre individuos, poblaciones y comunidades con su medio, cuyas interrelaciones generan procesos que permiten el funcionamiento de los ecosistemas (Gliessman, 2002). En este sentido el ecosistema genera unas funciones para mantener su propia existencia, las cuales también tienen el potencial de beneficiar a la sociedad. Cuando estas funciones son demandadas por una comunidad, cambia su conceptualización, convirtiéndose en un beneficio útil y real, pasando a ser un servicio ecosistémico al que la sociedad asigna valor.

Desde la ética de la tierra de Leopold y Aldo (1949), citado en Farber, Costanza y Wilson (2002), el valor de cualquier acción u objeto se mide por su contribución al mantenimiento de la salud y la integridad de un ecosistema o especie, *per se*, independientemente de la satisfacción humana. Esta posición eco céntrica puede ser interpretada como un sistema de valores intrínsecos, donde algo está "bien" cuando preserva la integridad, la estabilidad y la belleza de los ecosistemas, y está "mal" cuando tiende a lo contrario. Por otro lado, también se encuentran los valores instrumentales, los cuales reflejan la diferencia que algo hace a la satisfacción de las preferencias humanas. Los valores instrumentales, como los valores económicos, son fundamentalmente de naturaleza antropocéntrica (Farber et al., 2002).

Al alterarse la estructura y funciones de los ecosistemas, se genera una sistemática y acelerada pérdida de valor energético o de valor intrínseco. La medición tanto del valor de los ecosistemas, como de la pérdida de valor por su degradación, son desafíos que la economía ecológica sigue investigando y que presentan grandes retos en cuanto a unidades de medición, los niveles de commensurabilidad del valor de los ecosistemas, y el valor subjetivo del buen vivir para una sociedad, bajo nuevos compromisos con la calidad de vida y la protección de la naturaleza, de manera que el bienestar de las personas es la preocupación central, reconociendo la naturaleza como un sujeto con derechos y no como un objeto de desarrollo (Rodríguez & Cubillos, 2012).

La búsqueda de una unidad de medición del valor ha ocupado el interés tanto de economistas clásicos desde Marx y David Ricardo, proponiendo unidades de trabajo, y de estudiosos de las

ciencias naturales al plantear la energía (o subdivisiones como la emergía y la exergía) o el concepto de utilidad. Todos ellos asumieron un punto de vista unidimensional o reduccionista, proponiendo una teoría mono valor, la cual ha recibido críticas de importantes autores como Georgescu Roegen en 1983 y Martínez-Alier en varios de sus trabajos desde 1991. En la última década diversos autores plantean la multidimensionalidad del valor, o los múltiples lenguajes del valor (ecológico, cultural, social, político, monetario), o los valores plurales que no necesariamente deben reducirse a una única unidad de medida que los homogenice (De Groot et al., 2002; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Gómez-Bagethun & De Groot, 2007; Gómez-Bagethun & De Groot, 2010; Kumar, 2010; Segura & Aguilar, 2016; Pascual et al., 2017).

La consideración del valor de los SE con características propias multidimensionales, o también la noción de valores plurales, los cuales representan diferentes formas de relación con la naturaleza ha sido tratada por diversos autores como Martínez-Alier, Munda y O'Neill (1998); De Groot et al. (2002); Gómez-Bagethun y De Groot (2007); Kumar (2010); Jax et al. (2013); Dendoncker, Keene, Jacobs y Gómez-Bagethun (2014); Segura y Aguilar (2016), Gómez-Bagethun et al. (2014) y Arias-Arévalo (2017). La incorporación de un enfoque integrador de la diversidad o pluralidad tiene por objeto vincular las diferentes dimensiones del valor asociadas a los valores plurales y permite que el valor pueda ser abordado por distintas aproximaciones que se desarrollan desde la ontología, la epistemología y las ciencias socioecológicas (Pascual et al., 2017). En el trabajo de Wegner y Pascual (2011) presentado en la tabla 1-5, se habla de una teoría alternativa del valor social, caracterizada por ser dinámica, endógena y pluridimensional.

Tabla 1-5. Comparación de la teoría neoclásica del valor y la teoría alternativa.

	Economía neoclásica y del bienestar	Teoría alternativa
Teorías de la articulación de valor	El bienestar es unidimensional y consiste en la optimización de la utilidad.	El bienestar es pluridimensional y consiste en la realización de múltiples capacidades (incluidos los aspectos psicológicos, sociales y culturales).
	El valor es utilitario - valor económico total (VET).	El valor puede ser intrínseco.
	Todos los valores o preferencias existen a priori y pueden ser provocados por individuos de forma aislada (individualismo metodológico).	Algunos de los valores / preferencias deben ser construidas socialmente a través de la comunicación colectiva.
	Valor marginal y relativo.	Ecológica, "no linealidad".
	Modelos de equilibrio parcial del ecosistema.	Modelos que represente la complejidad del ecosistema.
	Omnisciencia.	Resiliencia de los ecosistemas, asumir la ignorancia y la incertidumbre.
	<u>Los precios son una medida neutra de valores o preferencias.</u>	<u>Los precios están influenciados por la distribución de la riqueza.</u>
	Los valores o preferencias son una expresión de la utilidad personal.	Los valores están influenciados por: la adaptación del individuo a las limitaciones del medio, la búsqueda de estatus, la moral, las preferencias, la ética y los puntos de vista religiosos.
Teorías de la agregación de valor	Todos los valores o preferencias son exógenas y commensurables monetariamente.	Los valores o preferencias pueden ser endógenas e incommensurables monetariamente.
	Los valores o preferencias son estáticos.	Los valores o preferencias son dinámicos.
	Todos los valores o preferencias se pueden medir en una escala cardinal y pueden realizarse comparaciones entre los individuos.	Existen valores o preferencias de grupos heterogéneos de personas que no se pueden medir en una escala cardinal y no puede realizarse comparación entre los individuos.

Fuente: Wegner y Pascual (2011)

1.2.3.1 La valoración de SE

En el marco de la discusión sobre el concepto del valor y la valoración, es interesante verificar el origen de la palabra “valor”, el cual proviene del latín “valere” que significa “ser fuerte, tener algún tipo de importancia” (Dendoncker et al., 2014). La Real Academia Española define “valor” como “la importancia, o la utilidad de algo”. El Diccionario de Oxford lo define como “el juicio de uno sobre lo que es importante” o el “alcance de la significación, importancia o validez de una cosa, acción, palabra o frase”.

En el trabajo realizado por Farber et al. (2002) se desarrolla un análisis importante sobre el concepto de valor, sistemas de valor y valoración de SE. En esta investigación los autores describen estos conceptos a lo largo de la historia, y presentan desde las diferentes disciplinas, las múltiples interpretaciones y distintos sentidos que se les han asignado. De este amplio trabajo se destaca la descripción realizada por Costanza (2000) del término “valor”, entendido como la contribución de una acción u objeto a una meta, objetivo o condición específica. En este sentido, Farber et al. (2002) afirman que el sistema de valor hace alusión a los marcos de referencia normativos, morales, de creencias y de necesidades que la humanidad usa para asignar importancia.

En la valoración de servicios ecosistémicos, la equivalencia entre las definiciones de valor e importancia plantea una aproximación conceptual más amplia, la cual ha sido utilizada por autores como Costanza et al. (1998), De Groot et al. (2002), Gómez-Bagethun y De Groot (2007), Gómez-Bagethun et al. (2014). La valoración se convierte en un proceso supeditado al juicio o comprensión de un grupo humano de la significación, la importancia, o el valor de los servicios ecosistémicos, enmarcado en un contexto biofísico, sociopolítico, cultural y temporal particular (Martínez-Alier et al., 1998).

La comprensión de la importancia de los servicios ecosistémicos, y por ende su valoración, es intrínsecamente compleja, debido a que afectan dimensiones tangibles e intangibles del bienestar humano. Asimismo se caracterizan por presentar umbrales de cambio irreversibles, la incertidumbre y los comportamientos emergentes difíciles de modelar y predecir, afectando de manera diferente a los grupos sociales (Aguilera, 2006; Wegner & Pascual, 2011).

La importancia de la valoración de los SE, según La-Roca (2010) radica en que ayuda a visibilizar aquellos elementos del funcionamiento de los ecosistemas que contribuyen directa o indirectamente al bienestar humano que, aunque no posean valor monetario, si cuentan con valor ecológico y socio-cultural. Por tanto, la percepción del valor de los SE no es reconocida espontáneamente por los seres humanos, hasta que no se identifica y se percibe el posible peligro de su pérdida, generalmente debido a que su provisión es gratuita.

Otro factor importante que deberá ser considerado, es la influencia que tiene la conciencia de las personas que habitan un espacio sobre la importancia que perciben de los servicios de los ecosistemas. Algunos servicios aparentemente no tienen ningún valor para la mayoría de la gente y por tanto podrían estar débilmente valorados, aunque cotidianamente sean observados. Por lo tanto, las intervenciones humanas en los ecosistemas por lo general maximizan la prestación de unos pocos SE, como la producción de alimentos y productos maderables cuyo valor es capturado por el mercado, reduciendo otros servicios ecosistémicos que son esenciales para la salud humana y el bienestar (Tilman, Cassman, Matson, Naylor & Polasky, 2002).

Generalmente, un alto nivel de conexión de un servicio ecosistémico con el bienestar humano facilita su valoración. Como lo plantea la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (2005) los

servicios de aprovisionamiento que impactan directamente al bienestar humano para el mantenimiento de una “vida decorosa”, son transados claramente en el mercado. Los servicios de regulación del clima, inundaciones, enfermedades, purificación del agua, son medianamente relacionados con valores monetarios. Los servicios estéticos, espirituales o educacionales tienden a tener bajos o nulos niveles de valoración económica o monetaria.

La infravaloración de los SE, según autores como Costanza y Folke (1997), De Groot, Perk, Chiesura y Marguliew (2000), también se da debido al bajo, o en algunos casos nulo, conocimiento de las funciones y estructura de los ecosistemas. Adicionalmente, existen grandes deficiencias en las instituciones, asociadas a factores como falta de definición de los derechos de propiedad, desinformación o asimetrías de información, lo cual conduce a insuficientes formas de apropiar, manejar y valorar los SE.

Ante la valoración de los SE, la economía ecológica plantea la necesidad de realizar cambios fundamentales epistemológicos en los lenguajes de valoración utilizados, debido a la imposición de ciertos lenguajes (desde lo monetario) y la eliminación de otros desde lo social, cultural y político. Condiciones que agudizan los conflictos económicos distributivos asociados a los derechos de propiedad y, como menciona Martínez-Alier (2006, p.12), “*incrementa los conflictos ambientales debido a la discrepancia de valoración dentro de un único sistema (la monetización)*”, al tratar de simplificar la complejidad.

En los últimos años se han desarrollado avances significativos relacionados con la valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en ecosistemas naturales como The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB, 2010) y The Strategic Plan for Biodiversity and the first Convention on Biological Diversity (CBD). Los cuales tienen como objetivo aumentar la conciencia sobre el valor de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Por otra parte, se han desarrollado iniciativas políticas como la European Biodiversity Strategy to 2020, el Ecosystem-based water security and the Sustainable Development Goals (SDGs), la Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) y el OpenNess Project. El SDGs plantea un observatorio mundial de los servicios de los ecosistemas acuáticos y una iniciativa para el desarrollo de la capacidad técnica y humana. La iniciativa IPBES es un enfoque aplicable a la interfase conocimiento – política que requiere una aproximación pluralística para reconocer la diversidad de valores. El OpenNess Project maneja un amplio conjunto de métodos de valoración (biofísicos, monetarios y socioculturales) aplicados en Europa. Se identifican además redes de trabajo en valoración de SE como el Ecosystem Services Partnership (ESP) (Gómez-Baggethun et al., 2014; Rincón-Ruiz et al., 2015; Pascual et al., 2016; Jacobs et al., 2016; Jacobs et al., 2018). En Colombia, el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt en el documento denominado “The Integrated Valuation of Biodiversity and Ecosystem Services” (IVBES, 2015) realiza una revisión conceptual de temáticas asociadas a la valoración integrada y las contribuciones metodológicas para llevar a cabo los procesos IVBES mediante estudios de caso en contextos rurales, destacando la importancia de reconocer el valor de los beneficios que los ecosistemas proporcionan a las personas y cómo esos valores se integran en la toma de decisiones (Rincón-Ruiz, 2015). Es de aclarar que los anteriores trabajos e investigaciones se han realizado específicamente en el contexto de los ecosistemas naturales.

La necesidad de establecer nuevos lenguajes de valoración de los SE, o marcos de valoración, es aún más apremiante en el contexto de los agroecosistemas. Si bien el propio concepto de agroecosistema sigue planteando constantes desafíos, evoluciones y adaptaciones, en esta investigación se propone una aproximación al concepto de agroecosistema sostenible como: “el agroecosistema sostenible es un ecosistema modificado para la producción de bienes y servicios

que genera bienestar a las comunidades, el cual es analizado como un sistema complejo que incluye variables y relaciones ecológicas, socioculturales, económicas, tecnológicas y políticas. Se diseña y maneja para imitar la estructura y función de los ecosistemas locales, involucrando el conocimiento tradicional y científico, de manera que las interacciones ecológicas y los sinergismos entre sus componentes, generen funciones y SE que garanticen en el tiempo la productividad y la protección del sistema a variables externas” Autor (2018) basado en Altieri y Nicholls (2000); Altieri (2002); Gliessman (2002); Altieri y Nicholls (2007); León (2009); Altieri et al. (2012); Altieri (2013); Sarandón y Flores (2014).

Los lenguajes de valoración, o la multidimensionalidad de la valoración de los SE generados por los agroecosistemas sostenibles, deben incluir valores ecológicos, económicos, socioculturales, políticos y tecnológicos. Ante esta pluralidad, es pertinente proponer marcos de valoración amplios, yendo más allá de los tres pilares de la valoración: ecológica, monetaria o crematística y social (De Groot et al., 2002; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Gómez-Baggethun & De Groot, 2007; Gómez-Baggethun & De Groot, 2010; Kumar, 2010; Dendoncker et al., 2014; Segura & Aguilar, 2016).

En la discusión sobre los marcos de valoración, surge la necesidad de plantear la pregunta ¿por qué valorar SE en agroecosistemas sostenibles? Pregunta que también fue planteada por Dendoncker et al. (2014) para los SE de ecosistemas naturales.

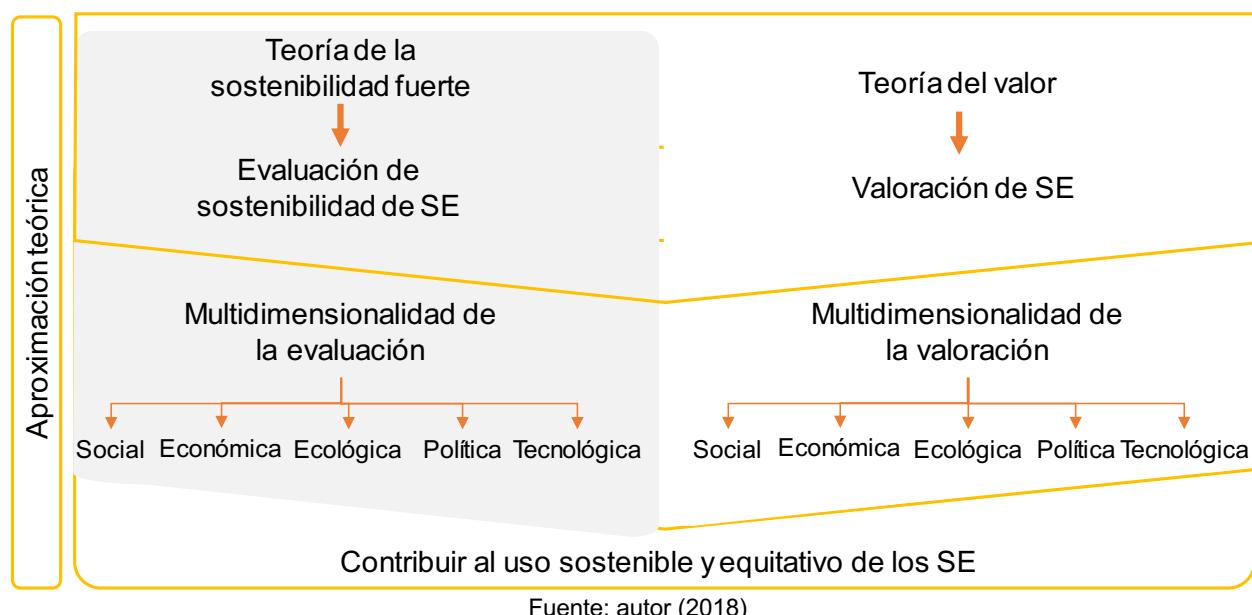
La valoración de SE se hace evidente cuando existe la necesidad de elegir entre diferentes alternativas de diseño y manejo que influencian los SE que se generan y los SE de los ecosistemas naturales que interactúan con el agroecosistema. Por lo tanto, como afirma Costanza y Folke (1997) los humanos toman decisiones entre alternativas que favorecen unos SE más que otros. Es así como la valoración se convierte en un insumo fundamental en la toma de decisiones.

La valoración también puede ser útil en múltiples escalas de toma de decisiones (local, regional, global) en las cuales está inmerso el agroecosistema. Por ejemplo, en lo político, para el diseño de incentivos, la definición de compensaciones por daños ambientales, la sensibilización sobre los SE, y las políticas de conservación de ecosistemas (Gómez-Baggethun & De Groot, 2007).

El objetivo final de la valoración es contribuir a un uso más sostenible y equitativo de los SE (Dendoncker et al., 2014). Desde la economía ecológica, la teoría de la sostenibilidad fuerte plantea que el capital natural no es sustituible por el capital financiero, debido a que existen límites biofísicos y energéticos para el desarrollo del proceso económico, el cual se sustenta en las relaciones Ecósfera – Econósfera (Gómez et al., 2007). Partiendo de este hecho, la sostenibilidad fuerte es definida como la viabilidad de la interacción compleja entre dos sistemas dinámicos, el socioeconómico y el ecosistémico (Costanza & Daly, 1992). Asimismo, el diseño y manejo de los agroecosistemas está condicionado por los límites biofísicos y ecológicos de los ecosistemas, de manera que se garantice la permanencia de sus funciones, y como consecuencia, de los SE que estas funciones proveen.

Desde la teoría de la sostenibilidad fuerte y la teoría del valor se presentan aproximaciones conceptuales equiparables al enfoque multidimensional. La primera aplica el enfoque para la evaluación de sostenibilidad del agroecosistema, y la segunda, para realizar la valoración de los SE en el mismo sistema. Estas relaciones son ilustradas en la figura 1-11.

Figura 1-11. Aproximación multidimensional de sostenibilidad y valoración



Fuente: autor (2018)

1.3 Estableciendo el valor multidimensional

El estudio del valor multidimensional de los SE cuenta con un número importante de trabajos (Martínez-Alier et al., 1998; De Groot et al., 2002; Martínez-Alier, 2006; Gómez-Baggethun & De Groot, 2007; Kumar, 2010; Jax et al., 2013; Dendoncker et al., 2014; Gómez-Baggethun et al., 2014; Segura & Aguilar, 2016; Gómez-Baggethun & Martín-López, 2015). Estos esfuerzos abarcan casi dos décadas de investigación sobre aproximaciones del valor que integran cada vez más la complejidad de los sistemas estudiados.

En este sentido, se propone que el valor multidimensional de los SE generados por los agroecosistemas sostenibles debe ser valorado **desde las dimensiones: ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política**. Tomando como premisa que la dimensión ecológica es la base de las demás dimensiones, al ser el fundamento para el desarrollo de la estructura, los procesos y las funciones ecosistémicas (regulación, hábitat, producción e información) que generan los SE. Al valorar desde diversas dimensiones, se aporta en la toma de decisiones para conservar y promover los SE, lo que redunda finalmente en la sostenibilidad de los agroecosistemas. Las relaciones descritas anteriormente son presentadas en la figura 1 -12.

Figura 1-12. Valoración multidimensional de SE en agroecosistemas



Fuente: autor (2018) adaptado de De Groot et al. (2002); Gómez-Baggethun et al. (2014); Segura y Aguilar (2016)

Cuando los SE se valoran desde las cinco dimensiones es difícil establecer los alcances de cada dimensión, ya que sus límites son difusos. Por ejemplo, la biodiversidad en los agroecosistemas es valorada desde la dimensión ecológica, en cuanto a su capacidad para generar SE como la prevención de alteraciones, el control de disturbios y el control biológico. SE que reducen el riesgo de pérdidas en las cosechas, generando además valor desde la dimensión económica. La dimensión sociocultural valora la biodiversidad por su aporte a la conservación de especies de uso ancestral. Desde la dimensión tecnológica se reconoce el valor de la biodiversidad, en la generación de conocimiento para el diseño de arreglos productivos utilizando especies locales. En la dimensión política, se reconoce el valor de la biodiversidad y los SE derivados, al generar instrumentos normativos que promuevan su uso racional y su conservación. A continuación, se realiza una aproximación a las dimensiones del valor de los SE.

1.3.1 Dimensión del valor ecológico

El valor ecológico es generalmente asociado a aspectos como la importancia de un ecosistema, la integridad de las funciones de regulación y de hábitat, la complejidad, diversidad y rareza. En síntesis, los valores ecológicos se relacionan con las funciones, procesos y componentes del ecosistema, de los que depende en última instancia la prestación de los SE (De Groot et al., 2002). Asimismo, Farber et al. (2002) indican que el concepto de valor ecológico se interpreta en forma de relaciones causales en el ecosistema, en este sentido una especie puede ser valiosa para un servicio específico como el control de la erosión y valiosa para la supervivencia de otras especies.

El valor ecológico subyace en la agrobiodiversidad, en las interacciones biológicas, en las sinergias que pueden surgir entre la variedad de especies (tanto cultivadas como silvestres) y el componente animal, al incorporar arreglos y formas de manejo que son consecuentes con las restricciones biofísicas locales aumentando el potencial productivo del agroecosistema. Aunado a la agrobiodiversidad, se valora la conectividad del agroecosistema con los hábitats de los ecosistemas en los cuales se encuentra inmerso, facilitando el intercambio y movimiento de especies (Pret, 1994; Altieri, 1995; Gliessman et al., 1998; Altieri, 2002; Harris, 2003; Altieri, 2009; Aguilar-Jiménez, Tolón-Becerra & Lastra-Bravo, 2011; Vargas & León, 2013; León, 2014; Díaz-

Manrique, 2014; Nicholls et al., 2015; Nicholls et al., 2017; Paleologos, Iermanó, Blandi & Sarandón, 2017; Güldner & Krausmann, 2017).

El valor ecológico también se relaciona con las funciones de regulación, que aportan SE como la mitigación del cambio climático y el almacenamiento de carbono. Además de la regulación hídrica, la prevención de alteraciones en el suministro de agua y el control de inundaciones. Se valoran otras funciones de regulación que proveen SE como el control biológico, la formación y retención del suelo y la asimilación de residuos (Gliessman, 2002; Altieri & Nicholls, 2004; Altieri & Nicholls, 2010; Altieri et al., 2012; Martín & Osorio, 2012; Ratnadass et al., 2012; Sarandón & Flores, 2014; Rositano & Ferraro, 2014; Nodari & Guerra, 2015; Barrezueta, 2015; Silva-Santamaría & Ramírez-Hernández, 2017; Garbach & Morgan, 2017; Daniels et al., 2017).

La sustentabilidad del agroecosistema se relaciona con el valor ecológico cuando los arreglos, prácticas y manejos consideran la reducción de los efectos ambientales negativos, así como la disminución del consumo de insumos externos como los agroquímicos y los combustibles fósiles. Se otorga valor ecológico a la capacidad del agroecosistema de generar SE que promuevan mayores niveles de autonomía (Dale & Polasky, 2007; Vargas & Lozano, 2009; Altieri et al., 2012; Nicholls & Altieri, 2013; Avellaneda-Torres, Rojas & León, 2014; Barrezueta, 2015; Sarandón & Flores, 2014; López, Herrera, Gonzalo & Reynoso, 2016; Nicholls et al., 2017; Vázquez & Martínez, 2017; Swagemakers et al., 2017).

Gómez-Baggethun y Martín-López (2015) señalan que algunos economistas ecológicos vinculan la noción de valor ecológico con las mediciones biofísicas de las necesidades metabólicas. La valoración biofísica incluye métodos como el análisis de flujo de materiales, métodos para cuantificar la huella ecológica y métodos basados en el cálculo de requerimientos energéticos o costos antrópicos de la actividad humana, incluyendo el análisis de energía incorporado, el costo de reemplazo energético, el análisis de emergencia y la producción primaria neta.

1.3.2 Dimensión del valor sociocultural

Las comunidades se caracterizan por valores estéticos, artísticos, educativos, espirituales, de lugar, de herencia, de conocimiento de los ecosistemas, entre otros. Valores que influyen en su modo de pensar y en las acciones que llevan a cabo hacia los ecosistemas y los servicios que proporcionan. Estas características en la mayoría de los casos no pueden ser valoradas monetariamente (Martínez-Alier et al., 1998; Costanza et al., 1998; Gómez-Baggethun & Martín-López, 2015). La literatura sobre los SE define los valores culturales como valores estéticos, artísticos, educativos y espirituales de los ecosistemas.

Los valores culturales incluyen aspectos intangibles como los valores de lugar y valores de herencia (Costanza et al., 1998). Dentro de la dimensión sociocultural se incorpora el valor del capital social, definido como las normas colectivas de reciprocidad y confianza mutua entre las personas, aspectos de la organización social que facilitan la coordinación y la cooperación para el beneficio mutuo (Chiappe, 2002).

En el contexto de los agroecosistemas, se otorga valor sociocultural a los SE que aportan a la seguridad alimentaria. SE relacionados con la disponibilidad y el acceso equitativo a alimentos variados, nutritivos e inocuos, a pesar de perturbaciones y eventos extremos de tipo climático, político o económico. Igualmente se valoran los SE que contribuyen a la soberanía alimentaria y al desarrollo de redes de producción, distribución y consumo a diferentes niveles geográficos (Conway, 1986; Altieri, 1989; Altieri, 2002; Dale & Polasky, 2007; Céspedes, Arboleda & Morales,

2010; de Schutter, 2010; Altieri et al., 2012; Bastida et al., 2013; Sarandón & Flores, 2014; Sánchez & Villegas, 2015; Lescourret et al., 2015; Nodari & Tomás, 2016; Nicholls et al., 2017).

Asimismo, como menciona Balvanera et al., (2011, p. 50) se han desarrollado múltiples estudios en campo sobre sistemas sociecológicos. Estudios que “señalan a la propiedad comunal y el manejo colectivo de recursos como elementos sustanciales para el mantenimiento y la resiliencia de estos sistemas”. En los agroecosistemas, se generan servicios ecosistémicos de información, ligados a los aspectos culturales y emocionales intangibles que promueven el desarrollo de lo que muchos autores llaman la “infraestructura social resiliente”. Infraestructura que se sustenta en la acción colectiva de las organizaciones locales, en las redes entre las comunidades, en la cohesión social, en la inclusión y el sentido de pertenencia, aspectos que aumentan la gobernanza sobre los SE (Estrada et al., 2000; Altieri et al., 2012; Altieri, 2013; Díaz-Manrique, 2014; Altieri & Nicholls, 2012; Machado et al., 2015; Nicholls et al., 2017; Vázquez & Martínez, 2017; Louah, Visser, Blaimont & de Cannière, 2017).

En lo referente a la valoración sociocultural se utiliza una colección heterogénea de métodos que no utilizan la mediciones monetarias y biofísicas. Como ejemplos de técnicas y métodos se tienen las evaluaciones subjetivas, las evaluaciones deliberativas, el análisis de preferencias, los modelos mentales y el análisis de ponderación (Gómez-Bagethun et al., 2014; Gómez-Bagethun & Martín-López, 2015).

1.3.3 Dimensión del valor tecnológico

Si bien, en la literatura de valoración de SE de ecosistemas naturales el valor tecnológico es incluido en los valores socioculturales, en el contexto de los agroecosistemas toma un carácter relevante para su diseño y manejo. Desde el conocimiento tradicional o local sobre los sistemas naturales y la generación de tecnologías apropiadas con el funcionamiento de los ecosistemas, se habla de una valoración desde lo tecnológico de aquellas prácticas y conocimientos que tienen el propósito de no afectar su capacidad de renovación a lo largo del tiempo. Conocimientos que justamente provienen de los servicios ecosistémicos de información, cultura, entre otros (Balvanera et al., 2011).

La tecnología es uno de los elementos de la cultura que recoge la complejidad del pensamiento y el accionar humano para transformarse en instrumentos, herramientas, equipos o sistemas (León, Mendoza & Córdoba, 2014). El valor de los SE para convertirse en parte de la cultura y del conocimiento tradicional y científico es denominado valor tecnológico, valor que luego se materializa en prácticas, hábitos, costumbres y tradiciones aplicadas al diseño y manejo de los agroecosistemas (Gliessman et al., 2007; Altieri et al., 2012; Sarandón & Flores, 2014; Cesano & Obermaier, 2014; Foyer, Jankowski, Blanc, Georges & Kleiche-Dray, 2014; Pérez et al., 2015; Sánchez & Villegas, 2015; Lescourret et al., 2015; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017; Louah et al., 2017).

El valor tecnológico otorgado al conocimiento local y científico de las funciones y SE, favorece que las prácticas estén subordinadas y adaptadas a las condiciones biofísicas y socioculturales del agroecosistema. Valorando la promoción de la autonomía local, la soberanía tecnológica y la soberanía energética basada en fuentes renovables (Altieri et al., 1999; Altieri 2002; Altieri et al., 2012; Cesano & Obermaier, 2014; Pérez et al., 2015; Sánchez & Villegas, 2015; Bautista, 2015; Dai, Chen, Hayat, Alsaedi & Ahmad, 2015; Salembier, Elverdin & Meynard, 2016; Nodari & Tomás, 2016; Figueira, 2016; Nicholls et al., 2017; Garbach & Morgan, 2017; Vázquez & Martínez, 2017).

1.3.4 Dimensión del valor económico

En la literatura los conceptos valor monetario y valor económico comúnmente se utilizan como si fuesen intercambiables, lo cual no es el propósito de este trabajo. Al denominar valor monetario se da una acepción pragmática al uso del dinero como unidad de medida del valor, acorde a lo planteado por Norgaard (2010, p. 1222) "estamos tratando de alcanzar una economía sostenible invocando el valor de los SE, pero haciéndolo menos efectivamente de lo que es necesario, porque nuestro punto de vista proviene de la economía insostenible".

La valoración monetaria se trabaja ampliamente desde la economía ambiental desde un enfoque centrado en las externalidades negativas como la contaminación o el agotamiento de los recursos, visión que se extendió posteriormente para abarcar los servicios ecosistémicos (Costanza et al., 1998). La literatura sobre valoración monetaria a menudo divide los valores en valores de uso y valores de no uso, cada uno desglosado posteriormente en diferentes tipos de valor que generalmente se suman al denominado valor económico total (Gómez-Baggethun & Martín-López, 2015).

El valor económico total considera los valores en valor de uso directo, valor de uso indirecto y valores de opción. Los valores de uso directo se derivan del uso y disfrute de los servicios de los ecosistemas ya sean extractivos o no extractivos. Los valores de uso directo extractivo se han relacionado tradicionalmente con servicios de aprovisionamiento como la agricultura o la pesca, mientras que los valores de uso directo no extractivo han estado relacionados principalmente con actividades recreativas, turismo y disfrute estético. Los valores de uso indirecto se asocian con los servicios de regulación (fertilidad del suelo, purificación del agua, regulación del clima, polinización, etc.). Por último, los denominados valores de opción están asociados con la satisfacción que los seres humanos derivan de asegurar que un servicio estará disponible en el futuro (Gómez-Baggethun & Martín-López, 2015; Aguilar & Segura, 2016).

En la presente investigación se propone incorporar un concepto de economía más amplio desde la economía ecológica. Al entender la economía como el cumplimiento general de las necesidades humanas, el valor económico de los SE estará asociado a su importancia para el bienestar de las comunidades (Gómez-Baggethun et al., 2014). Desde la economía ecológica se considera que el mantenimiento y la preservación de las funciones y servicios ecosistémicos no están condicionados a su valoración monetaria (Lomas et al., 2005).

Se otorga valor económico a los SE que aportan a la viabilidad del agroecosistema, como el aumento de la productividad en el tiempo, la promoción de balances energéticos positivos, la estabilidad en la producción de alimentos, y la diversificación de productos. En el valor económico se incorporan diversas unidades asociadas a la medición de la eficiencia y la productividad. Por ejemplo, mediante el balance energético se define la relación entre la energía invertida y la energía producida, estableciendo la eficiencia energética del agroecosistema (Altieri, 2002; De Groot et al., 2002; Gliessman et al., 2007; Balvanera et al., 2011; Bastida et al., 2013; de Molina & Caporal, 2013; Sarandón & Flores, 2014; Bautista, 2015).

Los agroecosistemas no se restringen a un cultivo o a una finca, sus límites físicos, biológicos, sociales, económicos, políticos son difusos (León, 2009). Se considera entonces evaluar el nivel de contribución del agroecosistema al bienestar rural (Altieri et al., 2012). En este sentido se otorga valor desde la dimensión económica a los SE que contribuyen a la diversificación de ingresos y la reducción de la pobreza, el buen vivir, la buena salud y la recreación (Altieri, 1989; Abaunza,

Arango & Olaya, 2011; de Molina & Caporal, 2013; Sámano, 2013; Figueroa, 2016; Machado & Ríos, 2016).

En la dimensión del valor económico, se han incorporado diversas unidades físicas asociadas a la medición de la eficiencia como las energéticas y las espaciales. Las energéticas, mediante el balance de entradas y salidas de energía de un sistema, para establecer el valor añadido al ecosistema en términos de “valores de energía”. Las unidades espaciales, mediante el concepto de “huella ecológica”, en el cual se cuantifica la cantidad de tierra que debe destinarse para la producción y el mantenimiento de cada bien y servicio consumido por una comunidad humana (Balvanera et al., 2011).

1.3.5 Dimensión del valor político

Los SE de los agroecosistemas están influenciados por un contexto político, el cual tiene la capacidad de afectarlos de igual o mayor manera que los determinantes ecológicos (León, 2009). Frente a estas influencias el agroecosistema reacciona activamente promoviendo cambios culturales, sociales y económicos que a su vez influyen en las decisiones políticas sobre la gestión y manejo de los SE (Gómez et al., 2007).

Se otorga valor político a un SE una vez que es protegido y se promueve su uso racional mediante instrumentos de política, ya sean mecanismos tributarios, incentivos, compensaciones, definición de áreas protegidas o la restricción de zonas para ciertos usos. El valor político puede reflejarse al incentivar la implementación de agroecosistemas sostenibles para el uso y conservación de procesos, funciones y SE (EM, 2003; Altieri & Nicholls, 2012; Altieri et al., 2012; de Molina & Caporal, 2013; Salazar-Centeno, 2014; Fonseca, Jarma & Cleves, 2014; Cesano & Obermaier, 2014; Turrent-Fernández, Cortés-Flores, Espinosa-Calderón, Turrent-Thompson & Mejía-Andrade, 2017; Vázquez & Martínez, 2017; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017; Daniels et al., 2017; Sabourin, Patrouilleau, Le Coq, Vásquez, & Niederle, 2017).

El valor político de los SE también es otorgado por la asignación de recursos para el fomento de la investigación, la promoción del conocimiento local y la formación de capital humano para la comprensión de las funciones y SE a nivel local, regional y nacional (Altieri & Nicholls, 2012; Altieri et al., 2012; de Molina & Caporal, 2013; Fonseca et al., 2014; Cesano & Obermaier, 2014; Nodari & Tomás, 2016; Turrent-Fernández et al., 2017; Vázquez & Martínez, 2017; Garbach & Morgan, 2017; Daniels et al., 2017).

1.4 Direccionando la valoración: los enfoques

Las dimensiones del valor hacen referencia al espectro o las partes desde las cuales se considera o se analiza el concepto de valor de los SE en agroecosistemas. Los procesos para establecer el valor en las diferentes dimensiones, se relacionan con los énfasis, desde los cuales se dirige el proceso de valoración. Al respecto, los diferentes autores incluidos en el análisis, proponen términos como aproximaciones, orientaciones, caracteres o rasgos. Para esta investigación, estos términos se agrupan como enfoques de valoración de SE (transdisciplinar, sistémico, ecológico, multidimensional y participativo). Los enfoques son identificados en la revisión de literatura, principalmente en los estudios de Altieri (2002); Altieri et al. (2012); Nicholls et al. (2017); Vázquez y Martínez (2017).

1.4.1 Enfoque transdisciplinar

Es uno de los énfasis más fuertes desde las dos ciencias, primero, porque la investigación se define desde el problema central y no desde una disciplina específica. Segundo, se adopta un enfoque orientado a resolver el problema, y tercero, involucra distintos tipos de conocimientos, tanto científicos y académicos, como conocimientos empíricos, locales y ancestrales (Castiblanco 2007; Gliessman et al., 2007).

La valoración desde un enfoque transdisciplinar es fundamental, ya que permite integrar disciplinas científicas con aspectos sociales y conocimientos de las comunidades agrícolas locales, para otorgar valor a los SE mediante la participación y el diálogo (Perfecto, Vandemeer & Wright, 2009; Altieri, 2009). En síntesis, el enfoque transdisciplinar desde la agroecología y la economía ecológica permite el análisis y valoración de los SE, comprendiendo las funciones ecológicas, los beneficios derivados de estas funciones que son percibidos por la sociedad, las interrelaciones y sinergismos de variables ecológicas, económicas y socioculturales que se llevan a cabo en un sistema complejo como es el agroecosistema (Altieri & Toledo, 2011; Méndez et al., 2013).

1.4.2 Enfoque sistémico

Desde el enfoque sistémico derivado de la agroecología y la economía ecológica se considera al agroecosistema como un sistema complejo, constituido por subsistemas, componentes y sus interrelaciones. Se identifican los subsistemas agrícola, pecuario, forestal e hídrico, los componentes antropocéntricos (maquinaria, fertilizantes, semillas, agua de irrigación, trabajo) y los componentes naturales (radiación solar, lluvia, viento, sedimentos, nutrientes y energía) (Gliessman, 2002). En el agroecosistema se llevan a cabo procesos de trasferencia de materia, flujos de energía, ciclo de nutrientes y mecanismos de regulación, los cuales interactúan de manera que los comportamientos emergentes y sinergismos contribuyen a la fertilidad, la productividad y la protección de los cultivos (Altieri, 2002).

1.4.3 Enfoque ecológico

En este enfoque la dimensión ecológica del agroecosistema establece límites productivos, económicos y biofísicos que condicionan el desarrollo de las demás dimensiones (Altieri, 2002; Gómez et al., 2007; León, 2009; de Molina & Caporal, 2013; Machado et al., 2015). El enfoque ecológico plantea el diseño de agroecosistemas que imiten a los ecosistemas locales, en su estructura, procesos y funciones, para generar SE que minimicen la dependencia de flujos energéticos externos, promuevan la diversidad de especies y hábitats, originen mayor resiliencia, estabilidad y productividad (Gliessman et al., 1998; Gliessman, 2002). El enfoque ecológico reconoce los límites y las leyes biofísicas que circunscriben el proceso económico dado en el agroecosistema, siendo una perspectiva integradora de las interacciones entre la economía y el entorno.

1.4.4 Enfoque multidimensional

Desde la teoría de la sostenibilidad fuerte parte el concepto multidimensional, debido a que simultáneamente deben integrarse los objetivos de las dimensiones ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política, objetivos que no son reemplazables entre sí. La teoría del valor desde la economía ecológica plantea el carácter multidimensional de los servicios ecosistémicos, al considerar los distintos tipos de valor y las interrelaciones existentes entre ellos. De esta

manera, al aplicar el enfoque multidimensional, el agroecosistema es analizado de forma holística, y la importancia de los SE es valorada integralmente (Martínez-Alier et al., 1998; De Groot et al., 2002; Martínez-Alier, 2006; Gómez-Bagethun & De Groot, 2007; Gómez-Bagethun et al., 2014).

1.4.5 Enfoque participativo

Resalta la importancia que tienen los conocimientos, experiencias y prácticas de las comunidades y científicos en la valoración de los servicios ecosistémicos, permitiendo integrar los diversos actores con la complejidad del agroecosistema (Berbés-Blázquez, 2012). Los conocimientos, saberes ancestrales y prácticas tradicionales, permiten el incremento de la comprensión individual y colectiva de los procesos y funciones del agroecosistema, logrando evidenciar la importancia o valor que tienen los SE para el bienestar de las comunidades (Méndez et al., 2013). Mediante el enfoque participativo, las decisiones que tomen los actores sobre los SE en el agroecosistema, estarán mediadas por su valoración (Dougill, Fraser & Reed, 2010; Nicholls et al., 2017; Turrent-Fernández et al., 2017; Minga, 2017; Louah et al., 2017).

El enfoque participativo se complementa al involucrar la valoración inclusiva y la aproximación deliberativa. La valoración inclusiva tiene en cuenta la diversidad de formas para expresar el valor (cualitativas o cuantitativas) y la diversidad de actores con diferentes perspectivas. La valoración inclusiva se favorece al promover las aproximaciones “bottom-up”, entendidas como las propuestas que provienen de las propias comunidades (Dendoncker et al., 2018). La aproximación deliberativa potencia la resolución de posibles conflictos sobre la asignación de los valores mediante una negociación participativa entre los interesados, permitiendo procesos de aprendizaje social. Esta aproximación abre la oportunidad de unir los valores en términos de perspectivas biofísicas, socioculturales, económicas u holísticas. La deliberación exige la inclusión de diferentes percepciones, grupos sociales y culturas, reconociendo el papel de las instituciones y de las normas sociales que sustentan las relaciones entre los humanos y la naturaleza (Pascual et al., 2017).

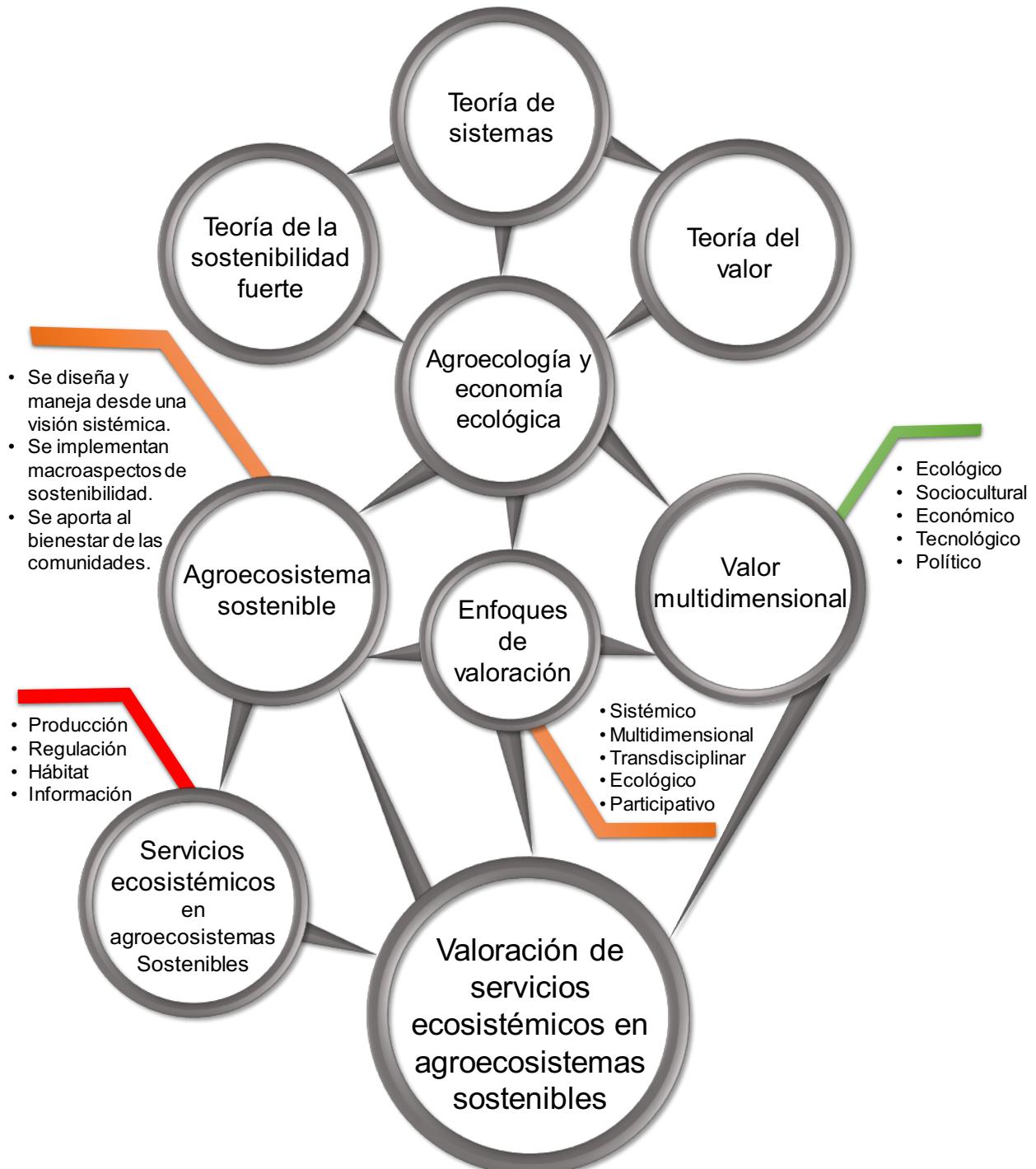
1.5 Articulación de las bases conceptuales y teóricas

Las bases conceptuales y teóricas de la agroecología y la economía ecológica dan fundamento para el planteamiento del concepto de agroecosistema sostenible. El cual tiene el potencial de generar SE al ser diseñado y manejado como un sistema complejo, implementando los macro aspectos de sostenibilidad y aportando al bienestar de las comunidades. Al generarse los SE, la articulación teórica desde los enfoques de valoración, permite identificar su importancia en las diferentes dimensiones del valor. El valor de los SE es utilizado en los procesos de toma de decisiones sobre la gestión de los agroecosistemas con lo cual se garantiza su provisión. Condición que mantiene un bucle virtuoso, en el cual el proceso de valoración, guiado por los enfoques, aporta a la sostenibilidad del agroecosistema. La articulación teórica propuesta es presentada en la figura 1-13.

Al articular las bases conceptuales y teóricas, se establecieron diversos aportes que son sintetizados en la figura 1-13. El primer aporte es una mejor comprensión de los conceptos sobre agroecosistemas, lo que permite identificar la relevancia de proponer un concepto de agroecosistema sostenible (numeral 1.1.1.2). La construcción del concepto de agroecosistema sostenible (AS) adicionalmente aporta elementos para su diseño y manejo. Estos elementos están condensados en sus rasgos fundamentales (ser diseñado y manejado desde una visión sistémica compleja, implementar macroaspectos de sostenibilidad, y aportar al bienestar de las comunidades). Desde el concepto de agroecosistema sostenible propuesto, se dio paso a un

segundo aporte, la identificación y compilación de los SE en agroecosistemas sostenibles (tabla 1-4).

Figura 1-13. Articulación de las bases teóricas y conceptuales para la valoración de SE en AS



Fuente: autor (2018)

El tercer aporte establece cinco dimensiones del valor de los SE en agroecosistemas: ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política (numeral 1.3). Los valores ecológicos se asocian a las funciones, procesos y componentes del ecosistema de los que depende la prestación de los SE (De Groot et al., 2002). En lo sociocultural, se basan en equidad, acción colectiva, inclusión y gobernanza. En lo económico, se relacionan con la eficiencia del sistema y los balances biofísicos. En lo tecnológico se asocian a los conocimientos y las prácticas locales. En lo político, incluyen los lineamientos y acciones de política para la gestión de SE.

El cuarto aporte, es el establecimiento de los enfoques de valoración, transdisciplinar, sistémico, ecológico, multidimensional y participativo. El enfoque transdisciplinar es fundamental en la agroecología y la EE, ya que permite integrar los aspectos socioculturales y los conocimientos de comunidades agrícolas a la valoración de los SE. Desde la EE el enfoque transdisciplinar permite analizar las interacciones de la sociedad, la economía y la naturaleza, incluyendo aspectos de equidad, distribución, ética y procesos culturales para la valoración de los SE. El enfoque sistémico, permite a la agroecología diseñar, manejar y evaluar agroecosistemas sostenibles, desde la EE permite reconocer los límites biofísicos y abordar la dimensión social como elemento de la sostenibilidad. El enfoque ecológico, desde la agroecología permite reconocer las estructuras y procesos para imitar a los ecosistemas locales, desde la EE determina la dimensión ecológica, como la dimensión sobre la cual se desarrollan y limitan las demás dimensiones de valoración. El enfoque multidimensional, permite el abordaje y valoración de SE de forma holística y finalmente el enfoque participativo, involucra las comunidades y su cultura en la gestión de los agroecosistemas sostenibles y los SE derivados.

Los agroecosistemas diseñados y manejados desde una visión sistémica, donde se implementan los macroaspectos de sostenibilidad y se aporta al bienestar de las comunidades tienen el potencial de ser agroecosistemas sostenibles y, por ende, generar SE. Al generarse los SE, los enfoques de valoración y las dimensiones del valor, permiten identificar su importancia. El nivel de importancia otorgado desde cada dimensión se traduce en la valoración de los SE, la cual es utilizada en los procesos de toma de decisiones sobre la gestión de los agroecosistemas, con lo cual se garantiza la provisión de los SE. Condición que mantiene un bucle virtuoso en el que el proceso de valoración aporta a la sostenibilidad del agroecosistema (figura 1-13).

La implementación de la articulación de las bases teóricas y conceptuales identificadas requiere de metodologías que permitan integrar los enfoques de valoración (transdisciplinar, sistémico, ecológico, multidimensional y participativo) con el valor multidimensional (ecológico, sociocultural, económico, tecnológico y político). Condición que plantea importantes retos metodológicos que deben ser abordados por la agroecología y la economía ecológica, integrando la “no linealidad”, las sinergias, los comportamientos emergentes, las interrelaciones, causalidades y jerarquías, la autoorganización y demás aspectos que sólo desde la modelación del agroecosistema como sistema complejo es posible analizar.

2. Aportes metodológicos desde la EE a la valoración de SE

En este capítulo se desarrollan los aportes metodológicos desde la economía ecológica (EE) para la valoración de servicios ecosistémicos (SE). Inicialmente se establecen las dimensiones, principios y criterios de valoración. A continuación, se identifican y analizan las metodologías de valoración desde la economía ecológica (EE). Finalmente, se propone un marco de valoración de SE en agroecosistemas que integra la articulación de las bases conceptuales y teóricas con los aportes metodológicos desde la EE.

El establecimiento de las dimensiones, principios, criterios y metodologías de valoración se basa en la revisión sistemática de literatura. Partiendo de la definición de las preguntas de investigación (I), la descripción de los parámetros de revisión de literatura (II) y la selección y análisis de documentos (III). La estrategia de búsqueda se especifica en la tabla 2-1.

Tabla 2-1. Estrategia de búsqueda

Etapa	Descripción
(I) definición de las preguntas de investigación guía del estado del arte	<p>¿Qué dimensiones de análisis, principios y criterios son utilizados para la valoración de SE desde la agroecología y la economía ecológica en agroecosistemas?</p> <p>¿Qué estructuras o metodologías son utilizados para la valoración de SE desde la agroecología y la economía ecológica en agroecosistemas?</p>
(II) parámetros de revisión de literatura	<p>a. Tipo de documentos que deben ser incluidos: reportes de investigación, libros, artículos en revistas indexadas, memorias de dissertaciones doctorales y de maestría relacionadas con las preguntas de investigación.</p> <p>b. Palabras claves y expresiones booleanas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • (Title ("ecosystem services")) and (title ("valorization and methodology")) or (all ("agroecosystem")) and (title-abs-key ("principle or criteria or indicator")) • (Title-abs-key ("agroecosystem") and title-abs-key ("ecosystem and services") and title-abs-key ("valuation")) • (Title-abs-key ("agroecosystem") and title-abs-key ("ecosystem and services") and title-abs-key ("value")) <p>c. Fuentes de información: science direct, springer, scopus, scielo y proquest.</p> <p>d. Periodo de búsqueda: 2000 -2017.</p>
(III) selección y análisis de documentos	<p>Análisis deductivo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • grado de aporte del documento a las preguntas de investigación. • incorporación de visiones de valoración desde la EE.

Fuente: autor (2018) basado en (Bautista et al., 2016)

(I) Definición de las preguntas de investigación

Analizadas las fuentes de información preliminares, se plantean las preguntas que guían la realización del estado del arte. Estas preguntas se encuentran relacionadas con el primer y segundo objetivos específicos del trabajo de investigación doctoral, los cuales son:

- Definir las bases teóricas que, desde la agroecología y la economía ecológica, permitan el abordaje integral de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas.
- Determinar los instrumentos metodológicos que, desde la economía ecológica y la agroecología, permitan el diseño de un modelo general de valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas.

Las preguntas planteadas como resultado del análisis de los documentos base se especifican a continuación:

- *¿Qué dimensiones de análisis, principios y criterios son utilizados para la valoración de SE desde la agroecología y la economía ecológica en agroecosistemas?*

En los artículos y/o documentos seleccionados se identifican dimensiones, principios y criterios. De igual forma se verifica si existe una estructura jerárquica entre los elementos a ser considerados en un modelo de valoración. Es relevante enfatizar que el foco principal para seleccionar la información es el estudio de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas.

- *¿Qué estructuras o metodologías son utilizados para la valoración de SE desde la agroecología y la economía ecológica en agroecosistemas?*

En los artículos y/o documentos seleccionados se identifican las metodologías utilizadas para valoración de SE.

(II) Parámetros de revisión de literatura

Para la realización de la revisión sistemática se emplean los siguientes criterios de selección de documentos:

- a. Tipos de documentos que deben ser incluidos: documentos científicos, obras de consulta, monografías especializadas, publicaciones de congresos, reportes de investigación, artículos de revistas científicas indexadas, tesis de grado (maestría y doctorado), textos legales (manuales y normatividad).
- b. Palabras claves y expresiones booleanas: las palabras claves y sus combinaciones junto con los criterios de búsqueda se definen para responder las preguntas de investigación documental. Se incluyen palabras claves en inglés y español, con el objetivo de considerar la producción de artículos científicos en temáticas asociadas a la agroecología en países latinoamericanos. Las palabras claves consideradas en la búsqueda en bases de datos y páginas web se presentan en la tabla 2-1.
- c. Fuentes de información: se emplean bases de datos en inglés y bases de datos en español. Adicionalmente se consultaron páginas web de instituciones internacionales y nacionales relacionadas con la generación de documentos de política, ecosistemas y conservación de la biodiversidad.
- d. Periodo de búsqueda de información: los documentos relacionados con las metodologías de valoración, definición de las dimensiones de análisis, principios y criterios se priorizan en el periodo 2000 a 2017. Sin embargo, no se descartan documentos fuera de este rango considerados relevantes.

(III) Selección y análisis de documentos

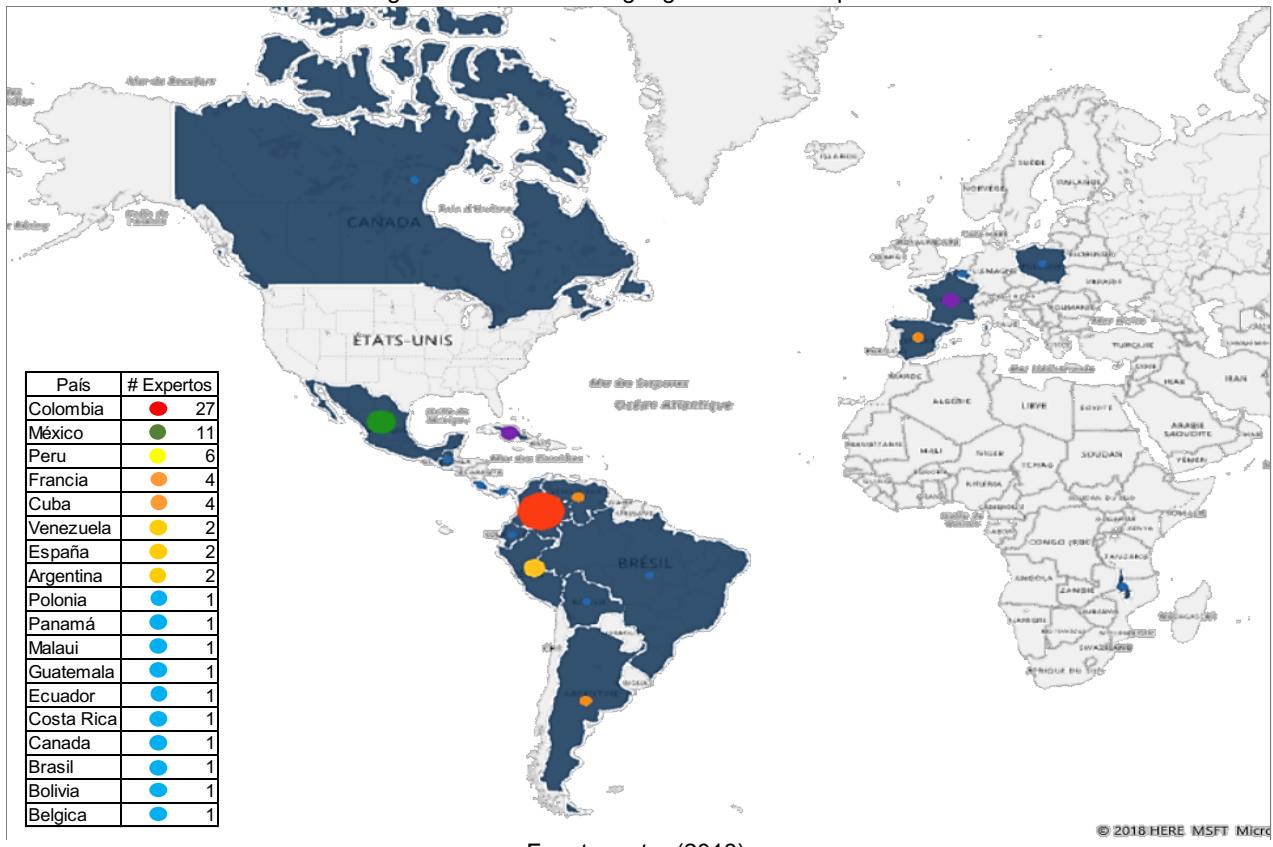
En la selección de documentos se incluye: su aporte para dar respuesta a las preguntas de investigación, el análisis de por lo menos una de las dimensiones de valoración (ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política), y su relación con la valoración no monetaria de SE en agroecosistemas.

Una vez se identifican las dimensiones, los principios y los criterios de valoración, se realiza la validación mediante el método de consulta a expertos propuesto por Dana, Kapuscinski y

Donaldson (2012), Willaarts, Volk y Aguilera (2012), Zwickle, Wilson y Doohan (2014) y Bautista (2015). La validación incluye las siguientes actividades:

- Diseño de la encuesta semiestructurada en línea en idioma español e inglés (anexo B).
- Perfil de los expertos: se incluyen los autores de artículos científicos considerados en el análisis de dimensiones, principios, criterios y metodologías de valoración. Igualmente, son expertos, los profesionales que se encuentren involucrados en organizaciones gubernamentales y no gubernamentales relacionadas con los SE y los agroecosistemas. En temas como investigación, gestión, desarrollo de políticas y trabajo con comunidades.
- Análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados de la encuesta.
- Definición de los principios y criterios que harán parte del marco de valoración propuesto por esta investigación.

Figura 2-1. Distribución geográfica de los expertos

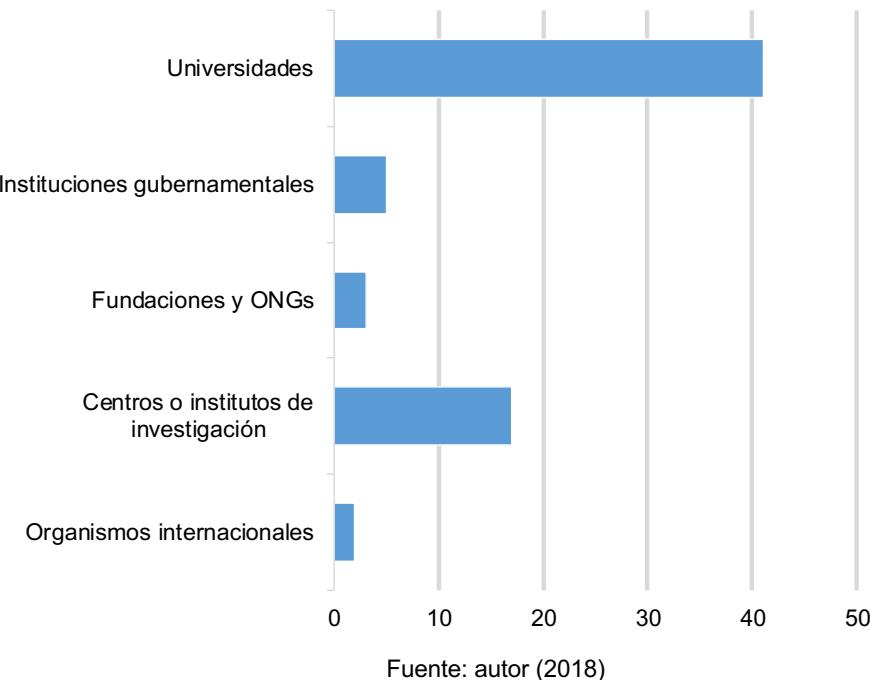


Fuente: autor (2018)

La invitación para hacer parte de la consulta se envió a 353 expertos de 18 países, las respuestas se recopilaron en un periodo de 3 meses, en el cual se resolvieron las inquietudes planteadas por los interesados en hacer parte de la consulta. Se recibieron 68 respuestas de expertos de 18 países, obteniendo mayor participación de países como Colombia, México, Perú, Francia, Cuba, Venezuela, Argentina y España. La distribución geográfica de los participantes se presenta en la figura 2-1.

En su mayoría los expertos se encuentran relacionados con universidades, centros de investigación y organizaciones gubernamentales. La distribución de la filiación se muestra en la figura 2-2.

Figura 2-2. Distribución de los expertos por filiación



Fuente: autor (2018)

En Colombia participaron investigadores de la Universidad Nacional (sedes Bogotá y Palmira), la Universidad de Antioquia, la Universidad del Tolima, la Universidad de los Llanos y la Universidad Libre. Participaron investigadores de Perú, de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo y la Universidad Nacional Agraria la Molina. Científicos mexicanos del Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) y del Colegio de Postgraduados. Investigadores de Cuba de la Universidad de Sancti Spíritus "José Martí Pérez" y la Universidad de Cienfuegos. Además, se contó con la participación de investigadores de la Universidad Técnica del Norte (Ecuador), de la Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia), de la Universidad Nacional de Costa Rica, de la University of Life Sciences in Poznań (Polonia), de la Universidad de Namur (Bélgica), y del laboratorio ERPI - Université de Lorraine (Francia).

La encuesta incluye la participación de expertos de organizaciones como la FAO¹, el PNUD² y la Fundación Natura. También de organizaciones gubernamentales como el CONICET³ y el INTA⁴ en Argentina. El IDEAM⁵, el Instituto Alexander von Humboldt⁶, el Jardín Botánico de Bogotá, el SENA⁷, el Ministerio del Medio Ambiente y el CIAT⁸ de Colombia. El INIFAP⁹ y la Secretaría de

¹ Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO

² Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD

³ El Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET

⁴ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA

⁵ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM

⁶ Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

⁷ Servicio nacional de aprendizaje, SENA.

⁸ Centro internacional de agricultura tropical, CIAT, en inglés international center for tropical agriculture.

⁹ Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias, INIFAP.

Agricultura de México, el CIRAD¹⁰/CIAT y el ITAB¹¹ de Francia, el INSA¹² de Brasil y el CIRAD de Canadá.

Los expertos trabajan en una gran diversidad de temáticas relacionadas con los servicios ecosistémicos y su valoración. Temáticas como: sistemas sostenibles agropecuarios y agroforestales, adaptación al cambio climático y la variabilidad climática, agroecología, agricultura campesina, antropología social, gestión de agroecosistemas, valoración ecológica de servicios ecosistémicos, gestión de bosques, manejo de cuencas hidrográficas, resiliencia socioecológica, extensión agropecuaria, política agropecuaria, cambio climático, desarrollo rural, análisis económico ambiental, sustentabilidad de territorios, desertificación y agroecología en sistemas de tierras secas.

Las respuestas de expertos de múltiples países, diferentes instituciones y organizaciones, diversidad de perfiles y temáticas de trabajo, aportan riqueza conceptual, metodológica y de experiencia desde los enfoques transdisciplinario y participativo. El análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados de la encuesta se presentan en el anexo B.

2.1 Dimensiones, principios y criterios de valoración

En el capítulo 1 se plantea la discusión teórica sobre el concepto de “valor” y se establece una aproximación al valor multidimensional de los SE en agroecosistemas sostenibles mediante cinco dimensiones: ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política.

Para aplicar las dimensiones de valoración en un agroecosistema sostenible se requiere del establecimiento de premisas fundamentales o bases ampliamente aceptadas por la comunidad científica, cada premisa debe estar soportada por una serie de condiciones medibles que permitan establecer el nivel de desarrollo del valor que se desea cuantificar. Se propone entonces, el desarrollo de las dimensiones de valoración mediante una serie de principios, criterios e indicadores.

Los principios y criterios asociados a las dimensiones de valoración de servicios ecosistémicos en agroecosistemas se identifican en documentos publicados desde el año 1994. En la figura 2-3 se observa un incremento relevante de publicaciones relacionadas desde el año 2007, triplicándose el número de estudios en el año 2015 y manteniéndose la tendencia en los años siguientes. Este comportamiento muestra un interés de la comunidad científica por el tema de valoración multidimensional de servicios ecosistémicos, y su relación con la sostenibilidad de los agroecosistemas. En el desarrollo de esta investigación los conceptos de principios y criterios se adaptaron de la propuesta de Bautista et al. (2016) debido a la consideración multidimensional en la evaluación de sostenibilidad realizada en su trabajo:

- Principios de valoración de SE: son premisas o bases universales para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles, cuyo nivel de cumplimiento demuestra el valor que los SE tienen para el funcionamiento del agroecosistema. Por lo tanto, a medida que los SE aportan a la productividad, la estabilidad, la confiabilidad, la resiliencia, la equidad y la autogestión, aumenta su valoración desde las dimensiones ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política.

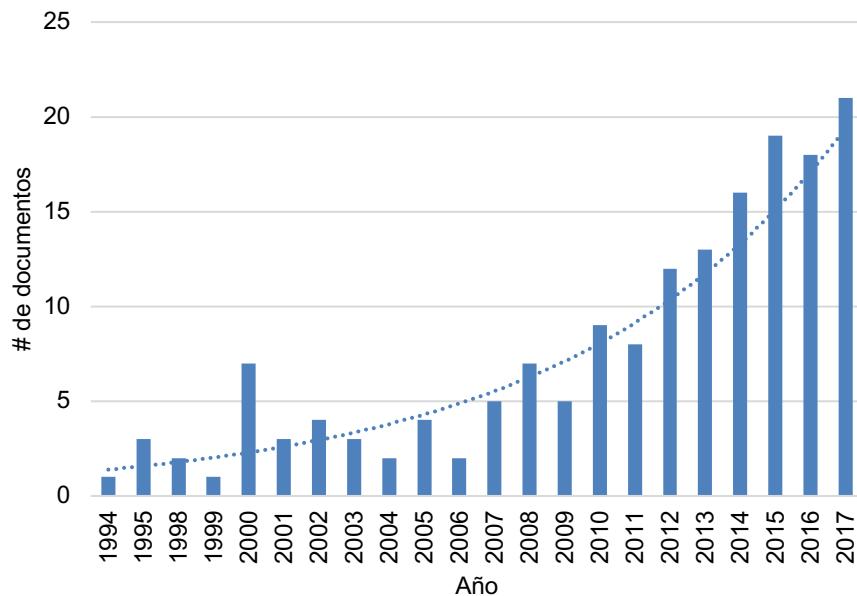
¹⁰ Le centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, CIRAD.

¹¹ Institut technique de l'agriculture biologique, ITAB.

¹² Instituto nacional do semiárido, INSA.

- Criterios de valoración de SE: son condiciones medibles cualitativa o cuantitativamente que establecen el nivel de implementación del principio de valoración.
- Indicadores de valoración de SE: son expresiones cualitativas o cuantitativas observables que relacionan una o más variables, permitiendo medir la aplicación de los criterios de valoración en un agroecosistema sostenible.

Figura 2-3. Publicaciones anuales en valoración de SE



Fuente: autor (2018)

Derivado de la revisión del estado del arte y la validación con expertos, se identifican y proponen principios y criterios para cada una de las dimensiones de valoración consideradas (ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política). En la tabla 2-2 se especifican los principios y criterios consolidados para cada una de las dimensiones de valoración de SE y la bibliografía asociada. Se identifican 171 artículos, de los cuales 120 aportan a la definición de principios y criterios.

Tabla 2-2. Dimensiones, principios y criterios de valoración de SE en agroecosistemas sostenibles

Dimensión ecológica de valoración	
El valor ecológico de los SE se otorga por su nivel de aporte a:	
Principio 1 (PEcol-1): aumento de la biodiversidad en el agroecosistema sostenible, de manera que se generen procesos y funciones ecosistémicas.	(Altieri, 1995); (Gliessman et al., 1998); (Vandermeer & Perfecto, 1995); (CIFOR, 2000); (Altieri, 2009); (Altieri & Nicholls, 2000); (Altieri, 2002); (Harris, 2003); (Altieri & Nicholls, 2005); (Leyva & Pohlan, 2005); (Lores, Leyva & Tejeda, 2008); (Altieri & Nicholls, 2007); (Yong, 2010); (Altieri et al., 2012); (Martín & Osorio, 2012); (Altieri, 2013); (Vargas & León, 2013); (Stupino, Iermanó, Gargoloff & Bonicatto, 2014); (Sarandón & Flores, 2014); (Caro-Caro & Torres-Mora, 2015); (Paleologos, Pereyra, Sarandón & Cicchino, 2015); (Nodari & Guerra, 2015); (Barrezueta, 2015); (Sánchez & Villegas, 2015); (Mateos-Maces, Castillo-González, Servia, Estrada-Gómez, & Livera-Muñoz, 2016); (Nodari & Tomás, 2016); (Salembier et al., 2016); (Paleologos et al., 2017); (Nicholls et al., 2017); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Güldner & Krausmann, 2017); (Daniels et al., 2017).

Dimensión ecológica de valoración	
El valor ecológico de los SE se otorga por su nivel de aporte a:	
Criterio 1 (CEcol-1): incremento de la biodiversidad, las interacciones biológicas y los sinergismos entre las especies presentes en el agroecosistema.	(Pearson & Ison, 1987); (Vandermeer, 1989); (Pret, 1994); (Altieri, 1995); (Gliessman et al., 1998); (Altieri, 2002); (Harris, 2003); (Altieri, 2009); (Aguilar-Jiménez et al., 2011); (Abaunza et al., 2011); (Altieri et al., 2012); (Martín & Osorio, 2012); (Altieri, 2013); (Vargas & León, 2013); (Stupino et al., 2014); (León, 2014); (Díaz-Manrique, 2014); (Sánchez & Villegas, 2015); (Paleologos et al., 2015); (Nodari & Guerra, 2015); (Barrezueta, 2015); (Wu, X., Wu, F., Wu, J., & Sun, 2015); (Nodari & Tomás, 2016).
Criterio 2 (CEcol-2): aumento de la conectividad del agroecosistema con los hábitats circundantes, permitiendo el movimiento y el intercambio de distintas especies.	(Nicholls et al., 2015); (Mateos-Maces et al., 2016); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Paleologos et al., 2017); (Güldner & Krausmann, 2017); (Daniels et al., 2017).
Principio 2 (PEcol-2): mejora de la resiliencia ecológica del agroecosistema sostenible, al imitar la estructura, los procesos y las funciones de los ecosistemas locales.	(Gliessman et al., 1998); (Altieri, 2009); (Altieri, 2002); (Martín & Osorio, 2012); (Sarandón & Flores, 2014); (Nodari & Guerra, 2015); (Barrezueta, 2015); (Osorio-González, 2015); (Sánchez & Villegas, 2015); (Nicholls et al., 2015); (Nicholls et al., 2017); (Paleologos et al., 2017).
Criterio 3 (CEcol-3): incremento de los procesos de transferencia de energía, materia y de las funciones de regulación, producción y hábitat.	(Gliessman, 2002); (Altieri, 2002); (Altieri & Nicholls, 2004); (Altieri, 2009); (Pérez, González & García, 2005); (Altieri et al., 2012); (Martín & Osorio, 2012); (Altieri & Nicholls, 2010); (Ratnadass et al., 2012); (Sarandón & Flores, 2014); (Rositano & Ferraro, 2014); (Nodari & Guerra, 2015); (Barrezueta, 2015); (Osorio-González, 2015); (Silva-Santamaría & Ramírez-Hernández, 2017); (Paleologos et al., 2017); (Güldner & Krausmann, 2017); (Garbach & Morgan, 2017); (Daniels et al., 2017).
Criterio 4 (CEcol-4): incremento del potencial productivo del agroecosistema, considerando las restricciones y potencialidades biofísicas locales.	(Altieri, 2002); (Martín & Osorio, 2012); (Álvarez, Mancilla & Cortés, 2007); (Nicholls & Altieri, 2013); (Cesano & Obermaier, 2014); (Nodari & Guerra, 2015); (Barrezueta, 2015); (Osorio-González, 2015); (Nodari & Tomás, 2016); (Nicholls et al., 2017).
Principio 3 (PEcol-3): reducción de los efectos ambientales negativos en el agroecosistema sostenible que puedan afectar la estructura, los procesos y las funciones ecosistémicas.	(Dale & Polasky, 2007); (Vargas & Lozano, 2009); (Altieri et al., 2012); (Nicholls & Altieri, 2013); (Avellaneda-Torres et al., 2014); (Sarandón & Flores, 2014); (Barrezueta, 2015); (López et al., 2016); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Swagelmakers et al., 2017).
Criterio 5 (CEcol-5): reducción del consumo de agroquímicos y combustibles fósiles.	(Altieri, 1995); (Gliessman et al., 1998); (Altieri, 2002); (Altieri & Nicholls, 2004); (Altieri, 2009); (Altieri et al., 2012); (Martín & Osorio, 2012); (Altieri & Nicholls, 2010); (Ratnadass et al., 2012); (Vargas & León, 2013); (Bonaudo et al., 2014); (Rositano & Ferraro, 2014); (Barrezueta, 2015); (Nicholls et al., 2015); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Swagelmakers et al., 2017); (Güldner & Krausmann, 2017).
Criterio 6 (CEcol-6): generación de microclimas que disminuyan las pérdidas de agua y suelo, debido a la radiación solar y el arrastre de los vientos.	(Altieri, 1995); (Gliessman et al., 1998); (Altieri, 2002); (Altieri, 2009); (Altieri, 2010); (Nicholls & Altieri, 2013); (Barrezueta, 2015); (Nicholls et al., 2015); (Nicholls et al., 2017).
Criterio 7 (CEcol-7): conservación, manejo y uso racional del agua.	(Varela, 2010); (Nicholls & Altieri, 2013); (Vargas & León, 2013); (Infante, A., & Infante, F., 2013); (Cesano & Obermaier, 2014); (Barrezueta, 2015); (Wu et al., 2015); (Nicholls et al., 2015); (Sánchez & Iván, 2016); (Nicholls et al., 2017); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017).
Criterio 8 (CEcol-8): disminución de la degradación y la pérdida del suelo, conservación y mejora de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.	(Altieri, 2002); (Pérez et al., 2005); (Altieri, 2009); (Altieri et al., 2012); (Martín & Osorio, 2012); (Vargas & León, 2013); (Iermanó, Sarandón, Tamagno & Maggio, 2015); (Bonaudo et al., 2014); (Peyraud, Taboada & Delaby, 2014);

Dimensión ecológica de valoración	
El valor ecológico de los SE se otorga por su nivel de aporte a:	
Criterio 9 (CEcol-9): reducción de la emisión de gases de efecto invernadero e incremento de su captura y almacenamiento, generando un balance positivo o neutro de gases como CO ₂ , CH ₄ , NO ₂ , HFC, entre otros.	(Barrezueta, 2015); (Machado et al., 2015); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017). (Altieri, 2010); (Altieri et al., 2012); (Vargas & León, 2013); (Montagnini, Somarriba, Fassola & Eibl, 2015); (Sánchez & Villegas, 2015); (Bautista, 2015); (Sánchez & Iván, 2016); (Nicholls et al., 2017).
Dimensión sociocultural de valoración	
El valor sociocultural de los SE se otorga por su nivel de aporte a:	
Principio 4 (PSoc-4): generación de bienes y servicios en el agroecosistema sostenible que aporten a la seguridad alimentaria de la población bajo condiciones cambiantes derivadas de perturbaciones y eventos extremos.	(Conway, 1986); (Altieri, 1989); (Altieri, 2002); (Céspedes et al., 2010); (de Schutter, 2010); (Altieri et al., 2012); (Bastida et al., 2013); (Sarandón & Flores, 2014); (Dale & Polasky, 2007); (Sánchez & Villegas, 2015); (Lescourret et al., 2015); (Nodari & Tomás, 2016); (Nicholls et al., 2017).
Criterio 10 (CSoc-10): reducción de la vulnerabilidad del agroecosistema al cambio climático y la variabilidad climática.	(de Schutter, 2010); (Altieri & Nicholls, 2008); (Vázquez, 2011); (Nicholls & Altieri, 2013); (Vargas & León, 2013); (Infante, A., & Infante, F., 2013); (Díaz-Manrique, 2014); (Barrezueta, 2015); (Nicholls et al., 2015); (Sánchez & Iván, 2016); (Nodari & Tomás, 2016); (Nicholls et al., 2017); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017).
Criterio 11 (CSoc-11): mantenimiento de la disponibilidad de alimentos bajo condiciones cambiantes.	(Céspedes et al., 2010); (de Schutter, 2010); (Pérez et al., 2005); (Dale & Polasky, 2007); (Álvarez et al., 2007); (Altieri et al., 2012); (Bastida et al., 2013); (Sánchez & Villegas, 2015); (Bautista, 2015); (Nicholls et al., 2015).
Criterio 12 (CSoc-12): mantenimiento del acceso a los alimentos y promoción de su distribución equitativa bajo condiciones cambiantes.	(Céspedes et al., 2010); (de Schutter, 2010); (Altieri et al., 2012); (Bastida et al., 2013); (Lope-Alzina, 2014); (Sánchez & Villegas, 2015); (Nicholls et al., 2017).
Criterio 13 (CSoc-13): mejoramiento de la calidad e inocuidad de los alimentos y nutrición de la población, incorporando especies locales.	(Céspedes et al., 2010); (de Schutter, 2010); (Altieri et al., 2012); (Sánchez & Villegas, 2015); (Nodari & Tomás, 2016); (Swagemakers et al., 2017).
Criterio 14 (CSoc-14): aumento de la soberanía alimentaria de manera que las redes de producción, distribución y consumo de alimentos saludables sean sostenibles a nivel local y regional.	(Altieri, 2002); (de Schutter, 2010); (Altieri et al., 2012); (Altieri & Nicholls, 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Pérez et al., 2015); (Nodari & Tomás, 2016); (Nicholls et al., 2017).
Principio 5 (PSoc-5): generación de infraestructura social resiliente en el agroecosistema sostenible, conservando los procesos y funciones ecosistémicas.	(Estrada et al., 2000); (Altieri et al., 2012); (Altieri, 2013); (Díaz-Manrique, 2014); (Altieri & Nicholls, 2013); (Machado et al., 2015); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Louah et al., 2017).
Criterio 15 (CSoc-15): mantenimiento y promoción de la acción colectiva en las organizaciones campesinas.	(Estrada et al., 2000); Ostrom (2000); (Lin, 2011); (Altieri et al., 2012); (Altieri & Nicholls, 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Cesano & Obermaier, 2014); (Machado et al., 2015); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Güldner & Krausmann, 2017); (Garbach & Morgan, 2017).
Criterio 16 (CSoc-16): aumento del capital social, las redes y lazos entre las comunidades, para hacer frente a las condiciones cambiantes.	(Altieri et al., 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Lope-Alzina, 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Díaz-Manrique, 2014); (Machado et al., 2015); (Russi, Gómez & Andreoni, 2015); (Figueroa, 2016); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Louah et al., 2017); (Garbach & Morgan, 2017).
Criterio 17 (CSoc-17): aumento de la gobernanza sobre los SE locales y reducción de los conflictos por su uso y acceso.	(Foyer et al., 2014); (Iniesta, 2015); (Villegas-Palacios, Berrouet, López, Ruiz & Upequi, 2016); (Nicholls et al., 2017); (Ruiz, 2017); (Bravo-Medina, 2017).

74 Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

Dimensión sociocultural de valoración

El valor sociocultural de los SE se otorga por su nivel de aporte a:

Principio 6 (PSoc-6): distribución, acceso y uso equitativo de los recursos productivos en el agroecosistema sostenible, conservando los procesos y funciones ecosistémicas.	(Gliessman et al., 2007); (Altieri et al., 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Sarandón & Flores, 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Nicholls et al., 2015); (Nicholls et al., 2017).
Criterio 18 (CSoc-18): mantenimiento del acceso y uso de los recursos productivos (tierra, semillas, agua, biodiversidad agrícola, tecnologías agroecológicas, redes de producción, crédito y mercados locales).	(Gliessman et al., 2007); (Altieri et al., 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Sarandón & Flores, 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Nicholls et al., 2017).
Criterio 19 (CSoc-19): mejoramiento de la distribución equitativa de los recursos productivos (tierra, semillas, agua, biodiversidad agrícola, tecnologías agroecológicas, redes de producción, crédito, y mercados locales).	(Gliessman et al., 2007); (Altieri et al., 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Sarandón & Flores, 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Nicholls et al., 2017).
Principio 7 (PSoc-7): mantenimiento y mejoramiento de la cohesión social en el agroecosistema sostenible, de manera que se conserven los procesos y las funciones ecosistémicas.	(CEPAL, 2007); (Altieri et al., 2012); (Nicholls & Altieri, 2013); (Fajardo, 2016); (Nicholls et al., 2017); (Swagemakers et al., 2017).
Criterio 20 (CSoc-20): aumento de la inclusión social de minorías y grupos vulnerables en la gestión de agroecosistemas y en la distribución de sus beneficios.	(Altieri, 2002); (CEPAL, 2007); (Altieri et al., 2012); (Díaz-Manrique, 2014); (Nicholls & Altieri, 2013); (Vázquez & Martínez, 2017).
Criterio 21 (CSoc-21): incremento del sentido de pertenencia contribuyendo a la adhesión social, la diversidad cultural, y los valores prosociales (solidaridad, respeto a las normas, tolerancia, seguridad).	(CEPAL, 2007); (Altieri et al., 2012); (Nicholls & Altieri, 2013); (Díaz-Manrique, 2014); (Pérez et al., 2015); (Fajardo, 2016); (Figueroa, 2016).

Dimensión tecnológica de valoración

El valor tecnológico de los SE se otorga por su nivel de aporte a:

Principio 8 (PTec-8): inclusión del conocimiento tradicional y científico, aumentando la soberanía tecnológica en el agroecosistema sostenible, conservando los procesos y las funciones ecosistémicas.	(Gliessman et al., 2007); (León, 2009); (Altieri et al., 2012); (Sarandón & Flores, 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Foyer et al., 2014); (Pérez et al., 2015); (Sánchez & Villegas, 2015); (Lescourret et al., 2015); (Nicholls et al., 2017); (Swagemakers et al., 2017); (Louah et al., 2017).
Criterio 22 (CTec-22): generación y uso de tecnologías innovadoras, subordinadas a las funciones ecosistémicas locales y adaptadas a las necesidades y recursos de las comunidades.	(Altieri, 1989); (Altieri et al., 1999); (Altieri 2002); (Altieri, 2009); (Altieri et al., 2012); (Sarandón & Flores, 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Pérez et al., 2015); (Sánchez & Villegas, 2015); (Salembier et al., 2016); (Nodari & Tomás, 2016); (Figueroa, 2016); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Swagemakers et al., 2017); (Louah et al., 2017); (Garbach & Morgan, 2017).
Criterio 23 (CTec-23): inclusión del conocimiento y las prácticas locales en el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles, reconociendo y conservando los sistemas agrícolas patrimoniales.	(Altieri, 1989); (Altieri et al., 1999); (Altieri 2002); (Altieri, 2009); (Altieri et al., 2012); (Sarandón & Flores, 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Pérez et al., 2015); (Sánchez & Villegas, 2015); (Salembier et al., 2016); (Nodari & Tomás, 2016); (Figueroa, 2016); (Nicholls et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Swagemakers et al., 2017); (Louah et al., 2017); (Garbach & Morgan, 2017).
Criterio 24 (CTec-24): aumento de la seguridad y la soberanía energética mediante el uso de fuentes renovables de energía.	(Estrada et al., 2000); (Altieri, 2010); (Altieri & Toledo, 2011); (Altieri & Nicholls, 2012); (Altieri et al., 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Sarandón & Flores, 2014); (Pérez et al., 2015); (Machado et al., 2015); (Dai et al., 2015); (Vázquez & Martínez, 2017).

Dimensión económica de valoración

El valor económico de los SE se otorga por su nivel de aporte a:

Principio 9 (PEcon-9): aumento de la productividad, mejorando la viabilidad económica del agroecosistema sostenible, conservando los procesos y las funciones ecosistémicas.	Criterio 25 (CEcon-25): aumento de la eficiencia energética del agroecosistema generando un balance energético positivo.	(Altieri, 2002); (De Groot et al., 2002); (Gliessman et al., 2007); (Bastida et al., 2013); (Sarandón & Flores, 2014); (Wu et al., 2015); (Nicholls et al., 2015); (Nodari & Tomás, 2016); (Mateos-Maces et al., 2016); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Paleologos et al., 2017); (Güldner & Krausmann, 2017); (Daniels et al., 2017); (Nicholls et al., 2017).
Criterio 26 (CEcon-26): mantenimiento de la estabilidad en la producción de alimentos bajo condiciones cambiantes o de estrés, generadas por perturbaciones o eventos extremos.	Criterio 27 (CEcon-27): incremento de la diversificación de ingresos, la generación de productos secundarios y alternativas conexas a la actividad agropecuaria.	(Altieri, 1989); (Altieri et al., 2012); (Bastida et al., 2013); (Sánchez & Villegas, 2015); (Nicholls et al., 2017).
Criterio 28 (CEcon-28): aumento de la diversidad de cultivos, adaptando la producción a cambios de mercado y necesidades locales.	Criterio 29 (CEcon-29): aumento en el uso de insumos locales que aportan a la viabilidad económica del agroecosistema.	(Beer et al., 2003); (Pérez et al., 2005); (Moonen & Barberi, 2008); (Abaunza et al., 2011); (Bastida et al., 2013); (Cesano & Obermaier, 2014); (Sayago, 2016); (Vázquez & Martínez, 2017); (Swagemakers et al., 2017); (Sosa-Fernández, López-Morgado, Toledo-Aceves & Bárcenas-Pazos, 2017).
Principio 10 (PEcon-10): reducción de la pobreza y mejora del bienestar humano en el agroecosistema sostenible, preservando los procesos y funciones ecosistémicas.	Criterio 30 (CEcon-30): incremento de oportunidades de empleo y mejora de los ingresos de las comunidades beneficiarias de los agroecosistemas.	(Beer et al., 2003); (Pérez et al., 2005); (Moonen & Barberi, 2008); (Abaunza et al., 2011); (Bastida et al., 2013); (Cesano & Obermaier, 2014); (Sayago, 2016); (Vázquez & Martínez, 2017); (Swagemakers et al., 2017); (Sosa-Fernández et al., 2017).
Criterio 31 (CEcon-31): incremento del buen vivir, la buena salud humana, la recreación y el beneficio espiritual de las comunidades locales.		(Pérez et al., 2005); (Altieri et al., 2012); (Bastida et al., 2013); (Bonaudo et al., 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Pérez et al., 2015); (Iermanó et al., 2015); (Vázquez & Martínez, 2017); (Swagemakers et al., 2017).

Dimensión política de valoración

El valor político de los SE se otorga por su nivel de aporte a:

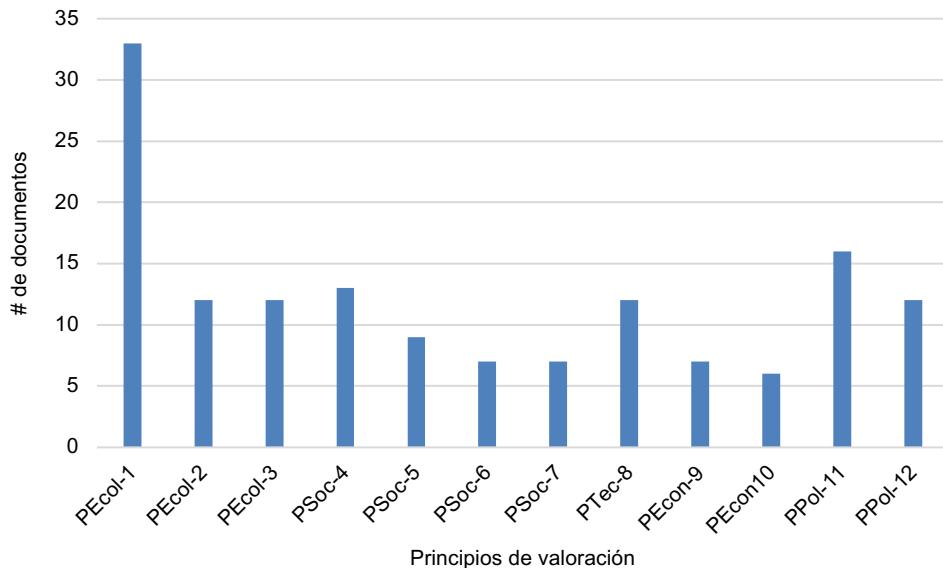
Principio 11 (PPol-11): generación de políticas nacionales que promuevan la implementación de agroecosistemas sostenibles, conservando los procesos y funciones ecosistémicas.	Criterio 32 (CPol-32): generación e implementación de incentivos para la reconversión de sistemas agrícolas en agroecosistemas sostenibles.	(EM, 2003); (Altieri & Nicholls, 2012); (Altieri et al., 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Salazar-Centeno, 2014); (Fonseca et al., 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Nicholls et al., 2017); (Swagemakers et al., 2017); (Daniels et al., 2017); (Sabourin et al., 2017).
---	---	---

Dimensión política de valoración	
El valor político de los SE se otorga por su nivel de aporte a:	
Criterio 33 (CPol-33): apoyo a la comercialización de productos y servicios derivados de agroecosistemas sostenibles.	(EM, 2003); (Altieri & Nicholls, 2012); (Altieri et al., 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Salazar-Centeno, 2014); (Fonseca et al., 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Nicholls et al., 2017); (Swagemakers et al., 2017); (Daniels et al., 2017); (Sabourin et al., 2017).
Criterio 34 (CPol-34): implementación de políticas que promuevan el acceso y adopción de tecnologías de bajo costo, adecuadas a las condiciones locales.	(Altieri & Nicholls, 2012); (Cesano & Obermaier, 2014); (Bautista, 2015); (Nodari & Tomás, 2016); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Sabourin et al., 2017).
Principio 12 (PPol-12): aumento de la investigación y la extensión agroecológica en los agroecosistemas sostenibles, promoviendo el conocimiento local y la preservación de procesos y funciones ecosistémicas.	(Altieri & Nicholls, 2012); (Altieri et al., 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Fonseca et al., 2014); (Cesano & Obermaier, 2014); (Nodari & Tomás, 2016); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Garbach & Morgan, 2017); (Daniels et al., 2017).
Criterio 35 (CPol-35): promoción de la investigación transdisciplinaria y participativa, basada en el conocimiento local.	(Vargas & Lozano, 2009); (Altieri & Nicholls, 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Cesano & Obermaier, 2014); (Lescourret et al., 2015); (Nodari & Tomás, 2016); (Casanova, Martínez, López, S., & López, G., 2016); (Nicholls et al., 2017); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Minga, 2017); (Louah et al., 2017).
Criterio 36 (CPol-36): fomento del capital humano y la extensión agroecológica adaptada a las necesidades de las comunidades, asociaciones y redes.	(Vargas & Lozano, 2009); (Altieri & Nicholls, 2012); (de Molina & Caporal, 2013); (Cesano & Obermaier, 2014); (Salazar-Centeno, 2014); (Lescourret et al., 2015); (Figueroa, 2016); (Nodari & Tomás, 2016); (Casanova, Martínez, López, S., & López, G., 2016); (Nicholls et al., 2017); (Turrent-Fernández et al., 2017); (Minga, 2017); (Vázquez & Martínez, 2017); (Louah et al., 2017); (Garbach & Morgan, 2017).

Fuente: autor (2018) basado en la bibliografía citada

En la figura 2-4 se presenta la relación del número de documentos con los principios de valoración identificados anteriormente.

Figura 2-4. Número de documentos vs principios de valoración de SE en agroecosistemas

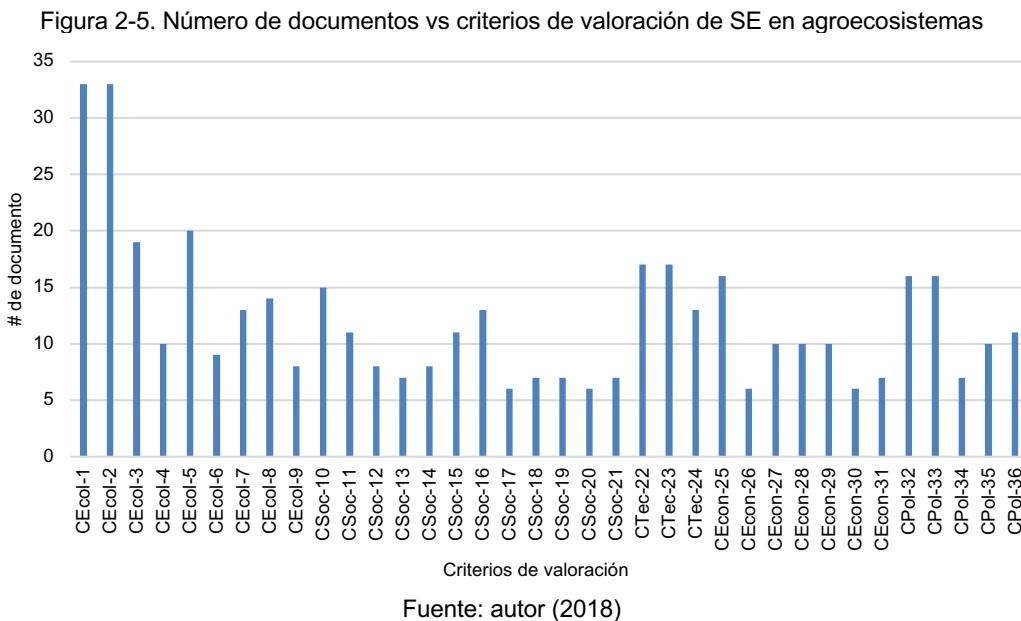


Fuente: autor (2018)

Se observa que el principio 1 de la dimensión ecológica es el que presenta mayor número de documentos asociados con un total de 33. Este principio está relacionado con el manejo y diseño de agroecosistemas incluyendo una alta biodiversidad, en concordancia con el argumento en el cual, la dimensión ecológica es la base de las demás dimensiones de valoración. Los principios dos y tres de la dimensión ecológica se asocian a un total de 12 documentos.

El principio cuatro de la dimensión sociocultural considera el tema de la seguridad alimentaria, tratado en la bibliografía consultada en 13 documentos. Los principios de la dimensión sociocultural seis y siete, se analizan en 7 documentos. Igualmente, los principios once y doce de la dimensión política tienen un importante nivel de citación y sus temáticas están asociadas a incentivar la implementación de agroecosistemas sostenibles y fomentar la investigación y extensión agroecológica.

En el análisis de documentos relacionados con los criterios de valoración, se observa una tendencia similar a la encontrada con los principios de valoración (figura 2-5).



Los criterios uno y dos de la dimensión ecológica se incluyen en un total de 33 documentos, en temas relacionados con el incremento de la agrobiodiversidad y la conectividad del agroecosistema con hábitats circundantes.

Los criterios tres y cinco de la dimensión ecológica se encuentran respectivamente en 19 y 20 documentos, en temáticas relacionadas con la promoción de procesos de transferencia de materia y flujos de energía, al igual que la reducción del consumo de insumos externos no renovables. Los criterios veintidós y veintitrés de la dimensión tecnológica, se encuentran en 16 documentos que consideran la generación, el uso de tecnologías innovadoras y la inclusión del conocimiento y las prácticas locales.

Los criterios de valoración diecisiete, treinta y treinta y cuatro, se relacionan con un menor número de documentos en temas de gobernanza sobre los SE locales, el incremento de las oportunidades de empleo y la implementación de políticas que promuevan el acceso y la adopción de tecnologías adecuadas a las condiciones locales.

2.2 Metodologías de valoración de SE desde la EE

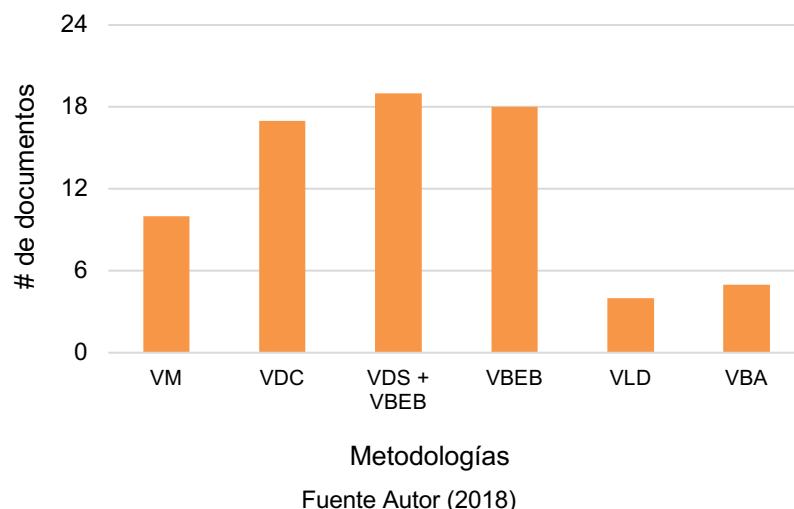
En la revisión sistemática de literatura se identifican 63 documentos que incluyen metodologías y herramientas para la valoración de SE en agroecosistemas desde la economía ecológica (EE). En la tabla 2-3 se relacionan los documentos identificados, los servicios ecosistémicos valorados, las herramientas o modelos aplicados, las dimensiones de valoración que fueron consideradas (ecológica, sociocultural, económica, tecnológica o política), igualmente los estudios se clasifican a nivel local o regional.

Finalmente, se discriminan las metodologías de valoración que se aplicaron en los trabajos analizados, ya sea valoración multicriterio -VM, valoración deliberativa - consultiva -VDC, valoración mediante modelación en dinámica de sistemas -VDS, valoración mediante balances energéticos o biofísicos -VBEB, valoración mediante lógica difusa VLD y valoración mediante modelación basada en agentes -VBA. Un estudio puede utilizar una o más metodologías de valoración.

En términos generales, la metodología de valoración mediante modelación en dinámica de sistemas y la metodología de balances energéticos o biofísicos se emplean en diecinueve (19) de los 63 documentos analizados. Las metodologías asociadas a técnicas deliberativas o consultivas se emplean en 17 documentos, la metodología de valoración multicriterio se utiliza en 10 documentos, la modelación basada en agentes en 5 documentos y la valoración mediante lógica difusa es empleada en 4 documentos (figura 2-6).

Figura 2-6. Documentos y nivel de utilización de las metodologías de valoración

Valoración multicriterio-VM, valoración deliberativa – consultiva- VDC, valoración mediante modelación en dinámica de sistemas- VDS, valoración mediante balances energéticos o biofísicos- VBEB, valoración mediante lógica difusa- VLD y valoración mediante modelación basada en agentes- VBA



Fuente Autor (2018)

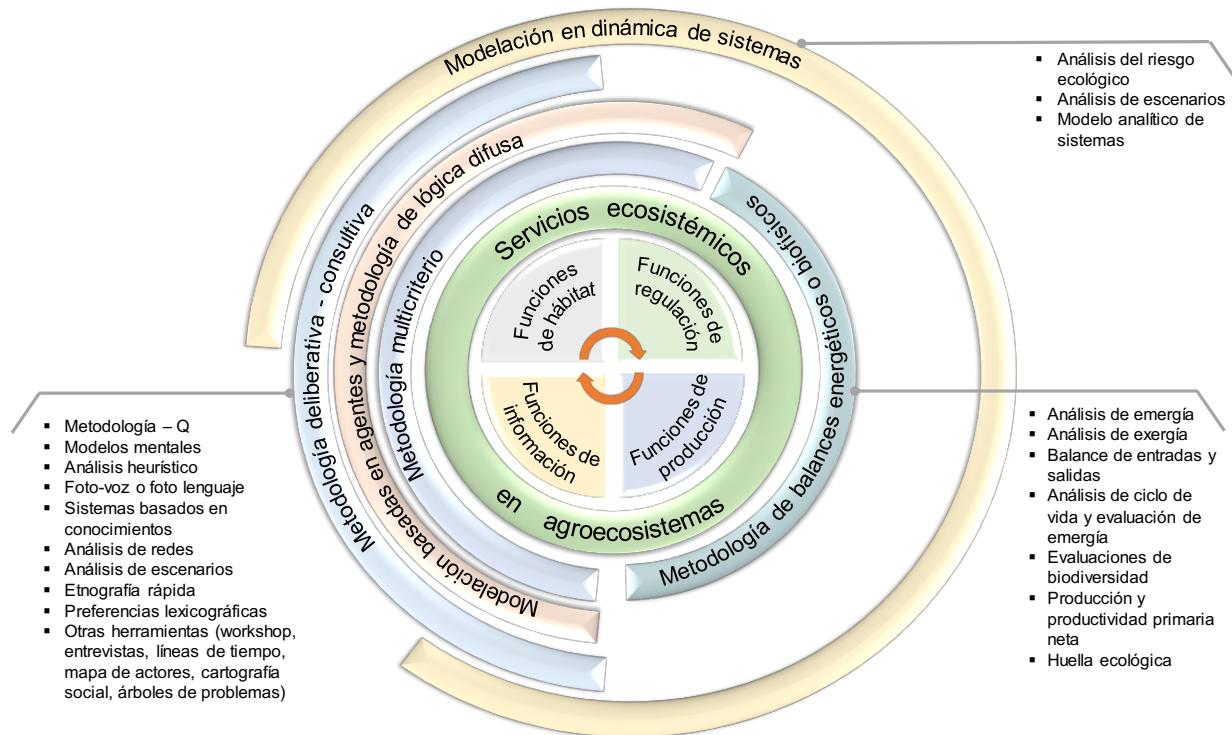
Los SE son valorados desde la economía ecológica bajo métodos que se fundamentan en el concepto de sistema natural con carácter sistémico. Los servicios ecosistémicos constituyen los flujos de energía, materia e información desde los sistemas ecológicos hacia los sistemas humanos (Lomas et al., 2005).

Considerando la importancia de comprender y valorar los SE en agroecosistemas y sus vínculos con los ecosistemas locales y la sociedad, más allá del valor monetario, la economía ecológica,

como resalta León (2009), tiene el desafío de aportar a la sostenibilidad de los agroecosistemas mediante metodologías de valoración.

Luego de la revisión de 63 estudios se establecieron relaciones entre las metodologías identificadas, los SE, y las técnicas aplicadas. Las correspondencias son presentadas en la figura 2-7, donde los servicios de regulación y producción son especialmente abordados desde la valoración mediante modelación en dinámica de sistemas y los balances energéticos o biofísicos. Los SE asociados al hábitat y la información son tratados en mayor medida por técnicas desde la valoración multicriterio, valoración mediante modelación basada en agentes y lógica difusa.

Figura 2-7. Métodos de valoración desde la economía ecológica



Fuente: autor (2018) basado en bibliografía citada en la tabla 2-3

Tabla 2-3. Metodologías de valoración de SE en agroecosistemas desde la EE

Funciones ecosistémicas FE: R-regulación, H- hábitat, P-producción, I-information. Dimensiones de valoración: ecológica E, económica Ec, sociocultural S, política P, tecnológica T. Metodologías: valoración multicriterio-VM, valoración mediante modelación basada en agentes- VBA, valoración deliberativa – consultiva- VDC, valoración mediante modelación en dinámica de sistemas- VDS, valoración mediante balances energéticos y/o biofísicos- VBEB, valoración mediante lógica difusa- VLD. Nivel de valoración: local – L, regional – R.

Publicación	FE	SE valorados	Herramienta/ modelo	Metodologías de valoración desde la economía ecológica							
				Dimensiones	Nivel	VM	VDC	VDS	VBEB	VLD	VBA
A01- Bockstael et al. (1995).	R	Ciclo hidrológico, calidad del agua y del suelo	SIG ¹³ , stella ®, PLM ¹⁴	E, Ec, P	R			x			
A02- Fu et al. (2000).	R	Ciclo de nutrientes, calidad del suelo	Stella ®	E	L			x			
A03- Panzieri, Marchettin y Hallam (2000).	R	Ciclo energético	Análisis de emergía, rendimiento	E, Ec	L			x			
A04- Seppelt (2000).	R	Ciclo de nutrientes	SIG, stella ®, escenarios	E, S	R			x			
A05- Zoebel (2000).	R, P, H	Ciclo de nutrientes, ciclo hidrológico, biodiversidad	Análisis input-output	E, Ec, T	R			x			
A06- Portela y Rademacher (2001).	R	Ciclo hidrológico, ciclo de nutrientes, captura de carbono, diversidad biológica	Stella ®	E, Ec, S, T	R			x			
A07- Tripathi y Sah (2001).	P	Producción de alimentos	Balance biofísico y energético	E, Ec	R			x			
A08- Musacchio y Grant (2002).	H, P, I	Protección de hábitats, producción de alimentos, historia, cultura	Stella ®, escenarios	E, Ec, S, P, T	R			x			
A09- Belcher, Boehm y Fulton (2004).	R	Calidad y mantenimiento del suelo	Stella ®, SAM ¹⁵	E, Ec, T	R			x			
A10- Shi y Gill (2005).	P, R	Producción de alimentos y materias primas, asimilación de residuos	Stella ®	E, Ec, S, P, T	R			x			
A11- Tscharntke, Klein, Kruess, Steffan-Dewenter y Thies (2005).	H, I	Biodiversidad, paisaje	SIG	E, T	L, R	x					
A12- Chen, G. Q., Jiang, Chen, B., Yang, y Lin (2006).	P, R	Provisión de agua, regulación de nutrientes, producción de alimentos	Análisis de emergía, rendimiento	E, Ec	R			x			

¹³ Sistemas de información geográfica¹⁴ Patuxent landscape model¹⁵ Sustainable agroecosystem model

Publicación	FE	SE valorados	Herramienta/ modelo	Metodologías de valoración desde la economía ecológica							
				Dimensiones	Nivel	VM	VDC	VDS	VBEB	VLD	VBA
A13- Kirsta (2006).	R	Calidad y funciones del suelo	SAM ¹⁶ , (modelo analítico de sistemas)	E, Ec, S	R			X	X		
A14- Ferraro (2008).	R, P	Ciclo energético, producción de bioenergía	Análisis de exergía	E	L				X		
A15- Pizzigallo, Granai y Borsa (2008).	R	Ciclo energético	Análisis de ciclo de vida, análisis de emergía	E, Ec	L				X		
A16- Zhang, Sa, Xiong, Cheng y Zhu (2008).	R	Control de plagas	Análisis estadístico	E, T	L					X	
A17- Ferraro (2009).	R, I	Ciclo de nutrientes en suelo, conocimiento investigación y funcionamiento de SE	Sistema basado en conocimiento, jerarquización de indicadores	E, S	L		X			X	
A18- Zuo-fang, Liuxing-tu, Fei, Li y Bo-long (2009).	R	Ciclo energético	Análisis de emergía, rendimiento	E, Ec	L				X		
A19- Cao, Xie y Zhen (2010).	P	Producción de alimentos	Energía total requerida, análisis input-output	E, P, T	R				X		
A20- Dougill et al. (2010).	P, R, I	Provisión de agua, regulación del clima, desarrollo cognitivo	Análisis de escenarios, software vensim ®	E, Ec, S, P, T	R			X			
A21- Jogo y Hassan (2010).	R	Ciclo hidrológico	Stella ®	E, Ec, P	L			X			
A22- Speelman y García-Barrios (2010).	R, P	Agrobiodiversidad, producción de alimentos	Netlogo 3.1.5	E, S	L					X	
A23- Abaunza, Arango y Olaya (2011).	P, R	Producción de alimentos, control de plagas	Stella ®	S, Ec, T	L			X			
A24- Chandra, Saradhi, Rao, Saxena y Maikhuri (2011).	R, P	Biodiversidad, producción de alimentos	Balance energético, análisis input-output	E, Ec, T	R			X			
A25- Limin, Jia y Xueping (2011).	R	Ciclo energético	Análisis de emergía, rendimiento	E, Ec	L			X			
A26- Berbés-Blázquez (2012).	R	Ciclo hidrológico	Photo-voice	E, S	R		X				

¹⁶ System-analytical modelling, is based on an information-hierarchical approach, as well as on numerical experiments with the use of vast experimental data on system dynamics

Publicación	FE	SE valorados	Herramienta/ modelo	Metodologías de valoración desde la economía ecológica							
				Dimensiones	Nivel	VM	VDC	VDS	VBEB	VLD	VBA
A27- Calvet-Mir, Gómez-Baggethun y Reyes-García (2012).	R, I, H	Fertilidad del suelo, ciclo hidrológico, recursos ornamentales y medicinales, conocimiento tradicional	Entrevistas semiestructuradas, observaciones participativas	E, S	L			x			
A28- Dana, Kapuscinski y Donaldson (2012).	R, H, I	Biodiversidad	Análisis de riesgo ecológico, evaluación de biodiversidad, workshop, consulta a expertos	E, S	R	x	x		x		
A29- Nainggolan et al. (2012).	R, P	Regulación y provisión de agua	Análisis de escenarios, mapas multitemporales	E, S, P	R				x		
A30- Manes et al. (2012).	R	Captura de gases contaminantes del aire	Stella ®	E	L			x			
A31- Mialhe, Becu y Gunnell (2012).	R, H	Ciclo hidrológico, hábitat	Algoritmos, sistemas dinámicos	E, Ec, P	R				x		
A32- Willaarts, Volk y Aguilera (2012).	R	Ciclo hidrológico	Balance MED ¹⁷ , consulta a expertos, AHP ¹⁸	E, S	L	x	x				
A33- Blanco, Pascal, Ramon, Vandenbroucke y Carrière (2013).	R	Biodiversidad	Evaluación de biodiversidad, SIG	E, T	R	x			x		
A34- Oteros-Rozas et al. (2013).	R, I, P	Ciclo hidrológico, prevención de incendios, turismo, paisaje, provisión de forraje	Entrevistas semiestructuradas, recolección sistemática de información, análisis estadístico multivariado	E, S	R	x	x				
A35- Sijtsma, van der Heide y van Hinsberg (2013).	R, H, I	Biodiversidad, bienestar	Análisis multicriterio	E, Ec, S	R	x					
A36- Velu (2013).	R	Microorganismos, eliminación y degradación de contaminantes	Análisis estadísticos, métodos fisicoquímicos y biológicos	E, T	L	x					
A37- Vidal-Legaz, Martínez-Fernández, Picón y Pugnaire (2013).	R, I	Paisaje, suministro de agua	Stella ®	E, Ec, S	R			x			
A38- Díaz-Manrique (2014).	P, R, I	Producción de alimentos, balance hídrico, calidad del suelo, cultura y familia	Stella ®	E, Ec, S, T, P	L			x			

¹⁷ Software específico para modelos hidrológicos espacializados¹⁸ Proceso de jerarquización analítica (AHP)

Publicación	FE	SE valorados	Herramienta/ modelo	Metodologías de valoración desde la economía ecológica							
				Dimensiones	Nivel	VM	VDC	VDS	VBEB	VLD	VBA
A39- Ricou, Schneller, Amiaud, Plantureux y Bockstaller (2014).	R, H	Polinización, hábitat	Lógica difusa basada en árboles de decisión	E	R		x			x	
A40- Rositano y Ferraro (2014).	P, R	Producción de alimentos, ciclaje de nutrientes, biodiversidad, provisión de agua, estructura y calidad del suelo	Red conceptual ucinet 6 ¹⁹ , panel de expertos, teorema de Bayes (distribución de condiciones de probabilidad)	E, S, T	R		x				
A41- Zwicker, Wilson y Doohan (2014).	R	Control biológico	Modelos mentales, análisis heurístico, consulta expertos	E, S, Ec, T	L		x				
A42- Bautista (2015).	P, R	Producción de materias primas, calidad del suelo, oferta de agua, biodiversidad	Stella ®, regresiones estadísticas lineales y no lineales, análisis multicriterio	E, Ec, S, P, T	R	x		x			
A43- Dai et al. (2015).	R, P	Ciclo de energía, producción de alimentos y energía	Análisis de exergía, análisis de ciclo de vida, análisis input-output	E, Ec	R				x		
A44- Gómez, Andrade y Vásquez (2015).	P, I	Producción de materias primas (alimentos)	AgroDiSi (Software para la simulación de modelos agropecuarios con dinámica de sistemas)	Ec	L		x				
A45- Ma, Eneji y Liu (2015).	R	Ciclo de nutrientes, regulación de gases, calidad del suelo	Análisis de emergía, análisis input-output	E, S	R			x			
A46- Wu et al. (2015).	P	Producción de alimentos y bioenergía	Análisis de emergía, eficiencia	E, Ec	L			x			
A47- Bravo-Monroy, Potts y Tzanopoulos (2016).	I	Mantenimiento de tradiciones y costumbres	Etnografía, métodos no paramétricos (chi-square y kruskal-wallis)	S, P, T	R		x				
A48- Ferreira, Sánchez-Román y Orellana (2016).	R	Abastecimiento de agua	Stella ®	E, Ec, T	R		x				
A49- Hanna, Osborne-Lee, Cesaretti, Misso y Khalil (2016).	P	Producción de alimentos	Huella ecológica, Stella®	E, Ec, S	G		x				
A50- Morales et al. (2016).	P	Producción de pasturas	Modelos mentales	E, S P, T	R		x				

¹⁹ Software para análisis de redes sociales

Publicación	FE	SE valorados	Herramienta/ modelo	Metodologías de valoración desde la economía ecológica							
				Dimensiones	Nivel	VM	VDC	VDS	VBEB	VLD	VBA
A51- Rodríguez et al. (2016).	R	Calidad del suelo	Consulta a expertos Lógica difusa, variables lingüísticas, análisis multiatributo	E	R		x			x	
A52- Villegas-Palacio et al. (2016).	R, I	Turismo, descontaminación del agua, biodiversidad	Workshops, grupos focales, foto-lenguaje, escenarios	E, Ec, S, P	L	x	x				
A53- Saarikoski et al. (2016).	I, R	Recreación, biodiversidad, irrigación	ACB ²⁰ , MCDA ²¹ , SMCE ²² , AHP	E, Ec, S, P, T	L	x					
A54- Winkler y Nicholas (2016).	R, I	Conservación de biodiversidad, paisaje, recreación, tradición	Q-metodología, análisis de componentes principales (ACP)	E, S	R		x				
A55- Belem y Saqalli (2017).	R, P	Cambio climático, producción de alimentos, seguridad alimentaria	Análisis de escenarios	E, Ec, S, P	R					x	
A56- Daniels et al. (2017).	R	Control de plagas, biodiversidad	Stella ®, escenarios, VUI ²³	E, Ec	R		x				
A57- Were, Tien, Dick, Singh (2017).	R	Secuestro de carbono, mitigación de cambio climático	Optimización en algoritmo genético evolucionario, SIG	E	R					x	
A58- Garbach y Morgan (2017).	R, I	Polinización, mantenimiento de tradiciones y costumbres	Análisis de redes	E, S, T	R	x					
A59- Güldner y Krausmann (2017).	R	Ciclo de nutrientes y fertilidad del suelo	Flujos biofísicos, análisis de input-output	E	R				x		
A60- Lecq, Loisel, Brischoux, Mullin y Bonnet (2017).	H	Refugio para la biodiversidad	Evaluación de biodiversidad	E	L				x		
A61- Liu et al. (2017).	R, P	Ciclo energético	Análisis de exergía	E	R				x		
A62- Louah et al. (2017).	P, I	Producción de materias primas	Q-metodología, ACP	S	L	x					
A63- Swagemakers et al. (2017).	P, R, I	Conservación de biodiversidad, paisaje	Q-metodología	S, P, T	R	x					

Fuente: autor (2018)

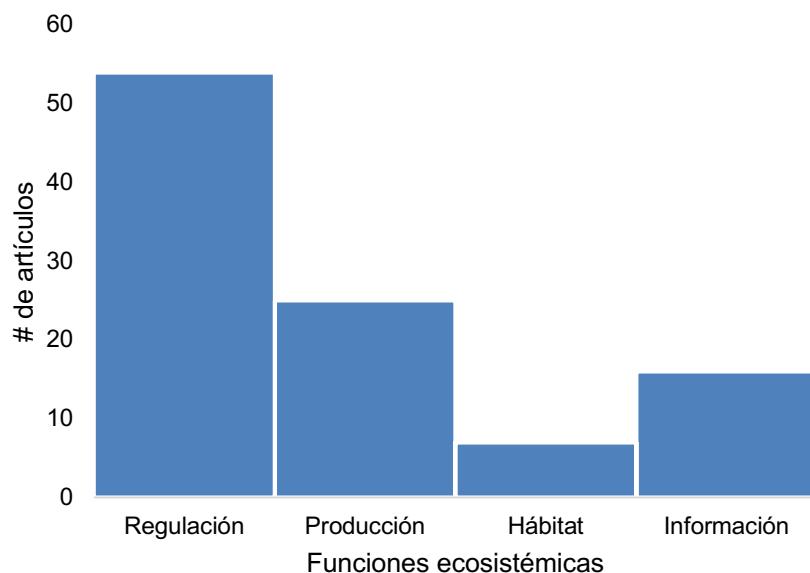
²⁰ Análisis costo - beneficio²¹ Análisis de decisión multicriterio²² Evaluación multicriterio social (SMCE)²³ Valor de uso indirecto

2.2.1 Relaciones entre funciones ecosistémicas, SE y metodologías de valoración

La información analizada en la tabla 2-3 refleja que una misma publicación puede abarcar dos o más funciones y SE. En 54 documentos se consideran SE de regulación como ciclos de nutrientes, formación de suelo, ciclo hidrológico, regulación de gases para mitigación de cambio climático, captura de carbono, ciclo energético, asimilación de residuos, control de plagas, prevención de alteraciones, calidad del agua y suelo. En 25 documentos se analizan servicios de producción de alimentos, materias primas, bioenergía, recursos ornamentales y medicinales. En 16 documentos se valoran servicios de información, como mantenimiento de tradiciones y costumbres, enriquecimiento cultural, conocimiento tradicional, desarrollo cognitivo, investigación, recreación, turismo y paisaje. Siendo la biodiversidad la base fundamental para la provisión de servicios ecosistémicos, solamente en 7 estudios se valoran servicios de protección de hábitat y biodiversidad.

El número de artículos asociados a las funciones ecosistémicas en agroecosistemas se puede observar en la figura 2-8.

Figura 2-8. Número de documentos vs funciones ecosistémicas en agroecosistemas

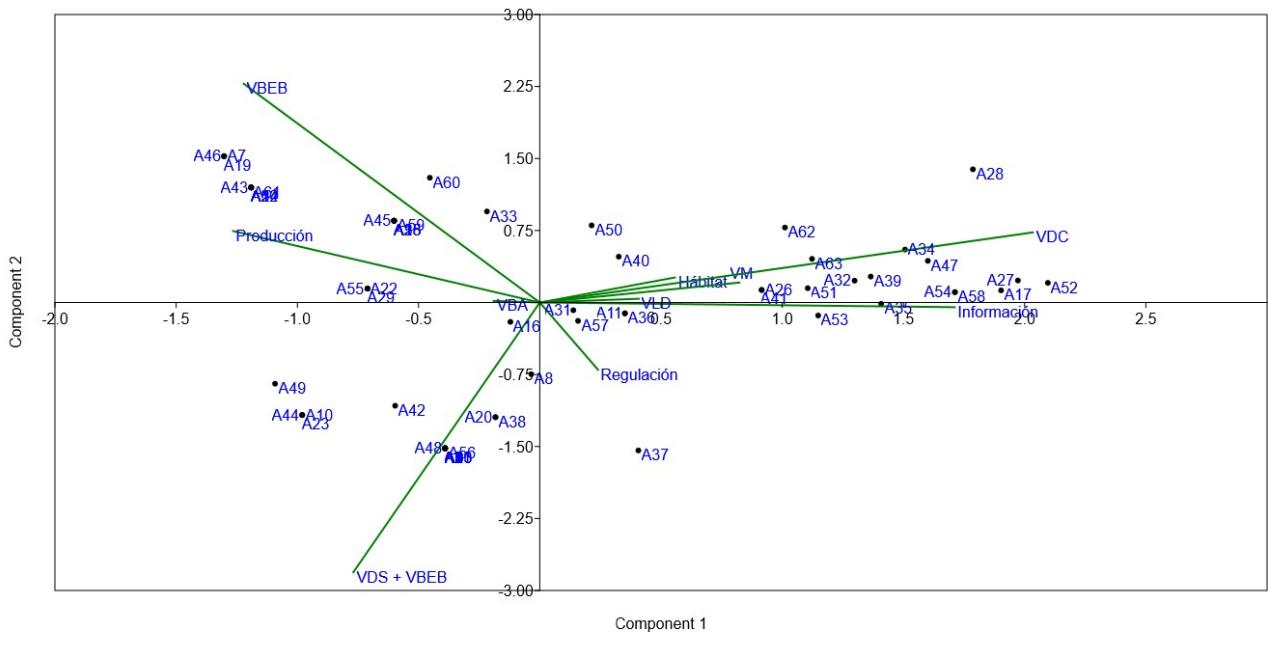


Fuente: autor (2018)

Al realizar un análisis de componentes principales (figura 2-9), la correlación entre las funciones ecosistémicas consideradas en los estudios y las metodologías de valoración, muestra que los servicios ecosistémicos asociados a las funciones de producción son altamente relacionados con la metodología de balances energéticos o biofísicos (VBEB) y con la valoración mediante modelación en dinámica de sistemas (VDS).

Los servicios de regulación son altamente valorados por la metodología de modelación en dinámica de sistemas y la metodología deliberativa consultiva (VDC). Por su parte, los servicios asociados a las funciones de hábitat e información tienen una alta correlación con metodologías de valoración multicriterio (VM) y deliberativa y consultiva (VDC).

Figura 2-9. ACP: funciones ecosistémicas en agroecosistemas y metodologías de valoración

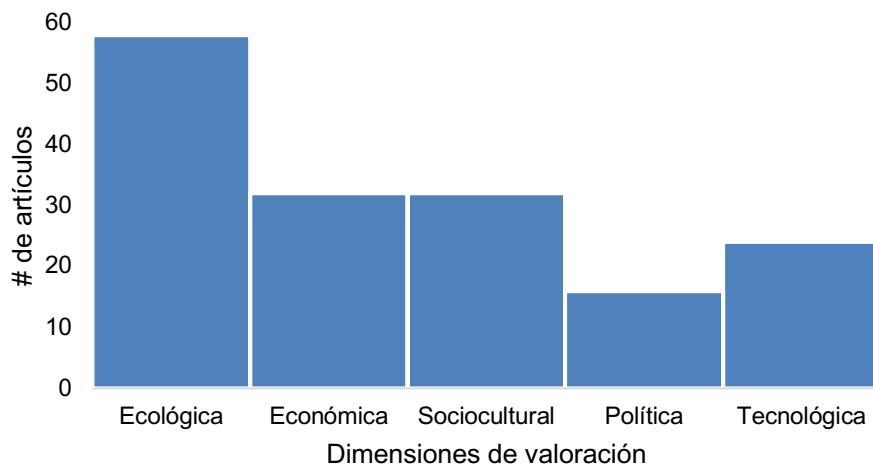


Fuente: autor (2018)

2.2.2 Relaciones entre dimensiones y metodologías de valoración

Mediante el análisis bibliográfico se identifica la utilización de cinco dimensiones: ecológica, económica, sociocultural, tecnológica y política (figura 2-10). La dimensión ecológica se considera en 58 artículos, haciendo evidente que es la dimensión sobre la cual se desarrollan las demás dimensiones.

Figura 2-10. Publicaciones vs dimensiones de valoración

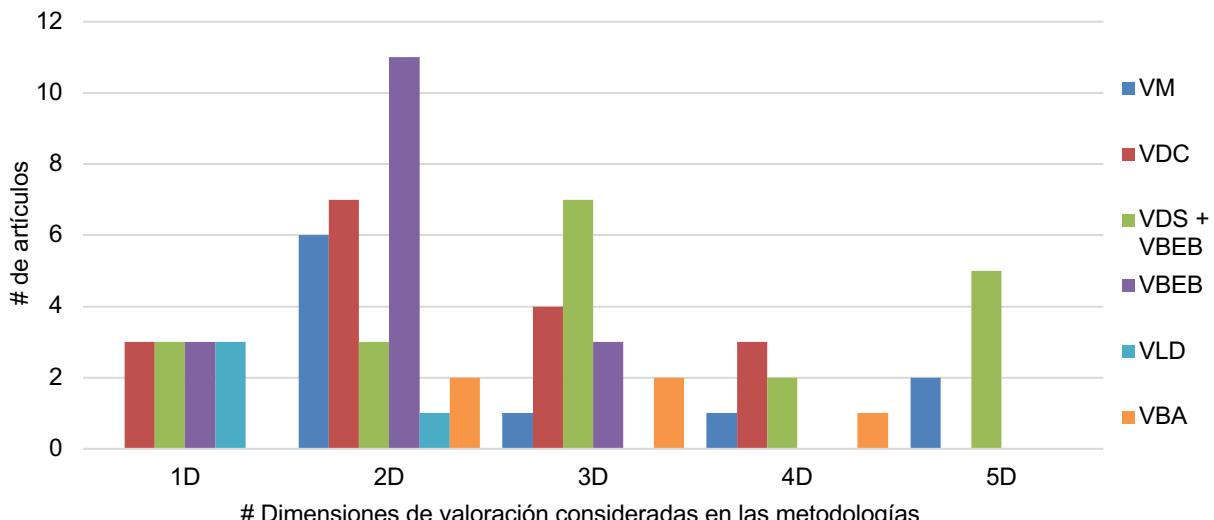


Fuente: autor (2018)

La dimensión económica se aborda en 32 documentos, en temas asociados a equilibrios energéticos y eficiencia en el manejo de los bienes y servicios ecosistémicos. La dimensión sociocultural se involucra en 32 publicaciones, valorando servicios ecosistémicos como la reducción de vulnerabilidad, el disfrute de los espacios, el paisaje y el conocimiento tradicional. La dimensión tecnológica se considera en 24 documentos, se destaca la valoración del conocimiento y las prácticas tradicionales adaptadas a las condiciones ecosistémicas particulares. Finalmente, la dimensión política se incluye en 16 documentos que consideran la gestión sostenible en los agroecosistemas.

En 11 documentos se considera una sola dimensión, en 23 estudios se trabajan dos dimensiones, en 17 publicaciones se analizan tres dimensiones, en 6 trabajos se involucran cuatro dimensiones y en 6 trabajos se incluyen las cinco dimensiones de valoración. En cinco documentos que abordan las cinco dimensiones, se emplea la metodología de dinámica de sistemas. La distribución del número de artículos, las dimensiones de valoración consideradas y las metodológicas asociadas se presentan en la figura 2-11.

Figura 2-11. Número de publicaciones vs dimensiones de valoración analizadas

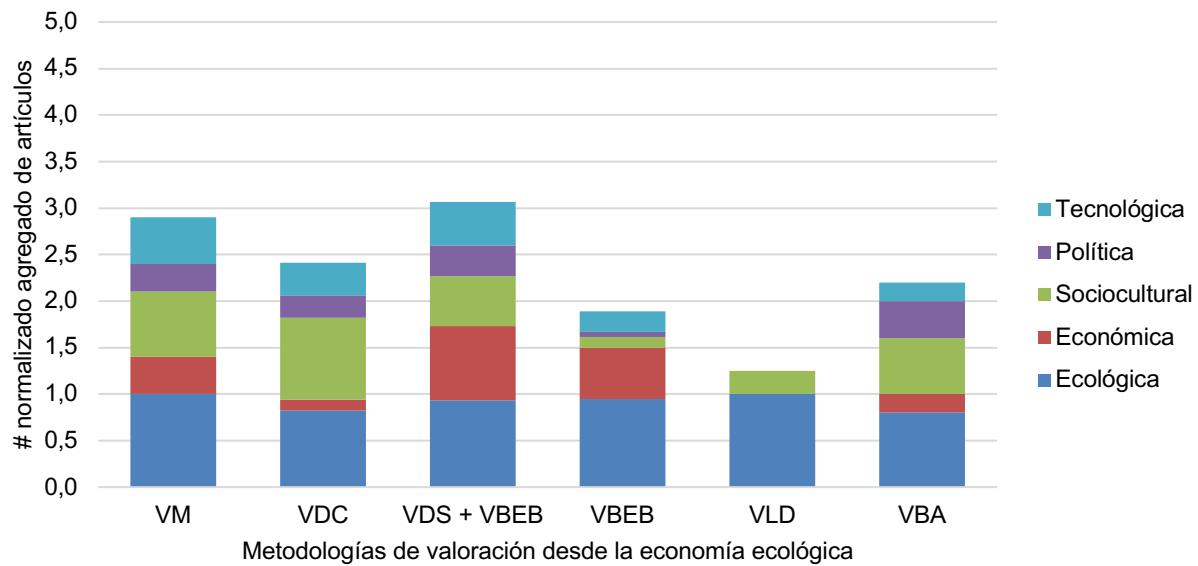


Fuente: autor (2018)

Respecto al uso de las metodologías, en primer lugar, se encuentra la valoración mediante modelación en dinámica de sistemas que se emplea en el 26% de los trabajos. En segundo lugar, la valoración mediante balances energéticos o biofísicos que se utiliza en el 25% de los documentos. En tercer lugar, la valoración deliberativa – consultiva que se aborda en el 23% de las publicaciones. En cuarto lugar, la valoración multicriterio con el 14% de los trabajos. La valoración mediante modelación basada en agentes se emplea en un 7% de los artículos y la valoración mediante lógica difusa en un 5% de los documentos (figura 2-12).

En cuanto a la integración de metodologías, dos estudios que aplican dinámica de sistemas igualmente integran valoración multicriterio y balances energéticos o biofísicos. En el caso de las publicaciones que trabajan metodologías deliberativas – consultivas, tres trabajos incluyen lógica difusa y valoración multicriterio. Metodologías con fundamento en las ciencias sociales como las deliberativas-consultivas difícilmente se integran con metodologías de las ciencias naturales como los balances energéticos y biofísicos.

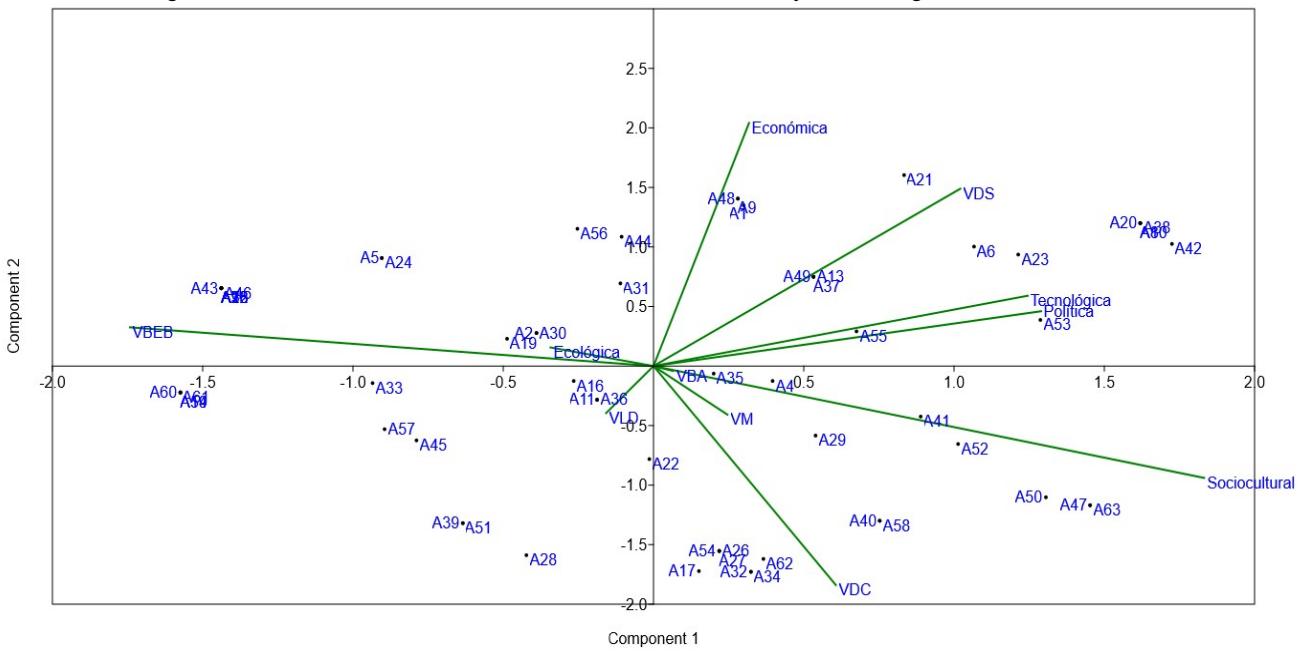
Figura 2-12. Documentos vs metodologías de valoración de economía ecológica



Fuente: autor (2018).

En la figura 2-13 se observa el análisis de componentes principales de los 63 estudios, los tipos de metodologías de valoración aplicadas y las dimensiones de valoración. Se identifica que la dinámica de sistemas tiene una alta correlación con las dimensiones: ecológica, política, tecnológica, económica y, una media-baja correlación con la dimensión sociocultural. La metodología deliberativa – consultiva, la valoración multicriterio y la valoración basada en agentes reflejan una mayor correlación con la dimensión sociocultural. La metodología de balances energéticos o biofísicos presenta una alta correlación con la dimensión de valoración ecológica (figura 2-13).

Figura 2-13. ACP: correlación de dimensiones de valoración y metodologías de valoración

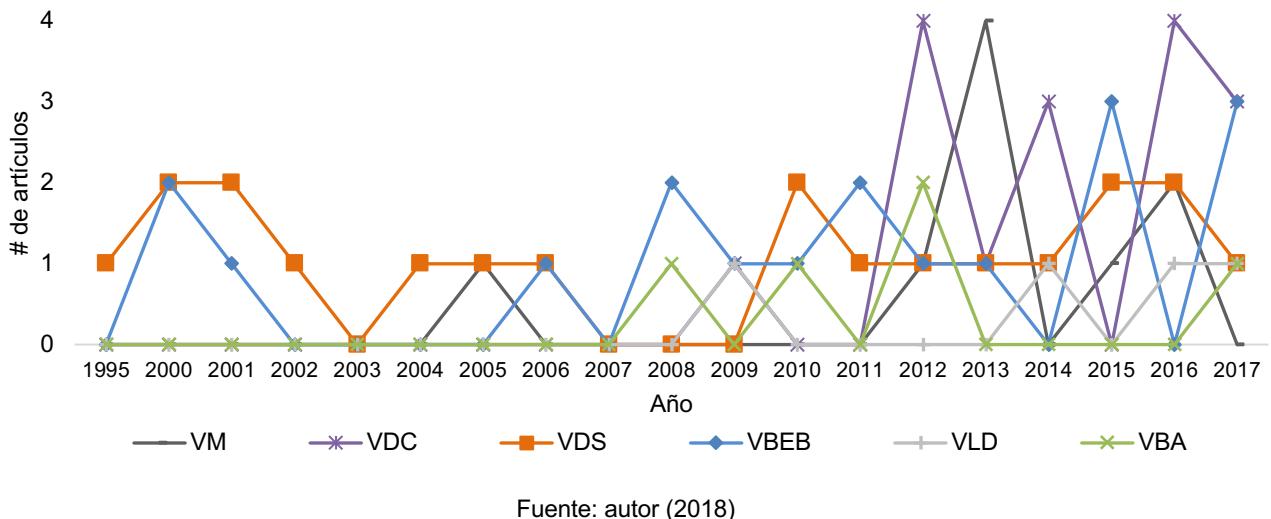


Fuente: autor (2018).

2.2.3 Análisis temporal de uso de metodologías de valoración

Para cada una de las metodologías identificadas se establece la cantidad de estudios realizados anualmente. La evolución temporal en el uso de metodologías de valoración desde la economía ecológica se observa en la figura 2-14.

Figura 2-14. Evolución temporal - metodologías de valoración desde la economía ecológica



Fuente: autor (2018)

Desde 1995 y hasta el año 2017, la dinámica de sistemas se emplea regularmente, mostrando que es una metodología validada y que permanece vigente en su aplicación. Desde el año 2008 inicia un comportamiento creciente en la variedad de metodologías aplicadas, especialmente deliberativas – consultivas y basadas en agentes. El incremento en la diversidad de metodologías refleja un interés en la valoración de servicios ecosistémicos, desde las cinco dimensiones del valor: ecológica, económica, sociocultural, política y tecnológica.

2.2.4 Descripción de metodologías de valoración desde la EE

En los 63 estudios analizados (tabla 2-3) se identifican las siguientes metodologías y herramientas de valoración de SE en agroecosistemas desde la economía ecológica:

2.2.4.1 Metodología de valoración multicriterio

La metodología se basa en el análisis multicriterio como herramienta utilizada en la toma de decisiones. El análisis incluye las preferencias de los tomadores de decisiones y de las diferentes partes interesadas sobre unos criterios de evaluación, para establecer los niveles de impacto que una acción, un tipo de gestión, una política o un proyecto, pueden tener sobre el entorno. Los criterios son ponderados, generándose pesos relativos que son aplicados a la decisión que se desea tomar para determinar la mejor opción (Velu, 2013).

La valoración multicriterio permite incorporar aspectos cualitativos y cuantitativos de índole social (Saarikoski et al., 2016). El proceso analítico como lo plantea Munda (2004) considera la jerarquización de los criterios, utilizando generalmente el método de “ponderación ascendente jerárquica” de siete etapas (Saaty, 1990). (1) Análisis institucional: identificación de actores, caracterización del marco legal e institucional. (2) Estructura de la decisión: declaración del

problema común. (3) Objetivos y criterios: identificar qué valores son más importantes para los participantes en esta situación particular. (4) Establecer alternativas: se deben incluir las limitaciones pertinentes. (5) Identificación de consecuencias: es decir, evaluar la conveniencia de las alternativas según los criterios propuestos. (6) Ranking de alternativas: mediante la aplicación de un procedimiento de agregación. (7) Análisis del impacto social: discutiendo las implicaciones de cada alternativa para los grupos de actores principales (Saarikoski et al., 2016).

2.2.4.2 Metodologías de valoración deliberativas – consultivas

Este grupo de metodologías tienen en común la incorporación de estrategias o técnicas desarrolladas desde las ciencias sociales. Su objetivo es consultar las opiniones, los conocimientos, los lenguajes, las representaciones, los imaginarios, y demás aspectos asociados a los actores humanos que interactúan con el agroecosistema. Las técnicas pueden considerar la interlocución directa con los actores, o pueden optar por la observación, o una mezcla de ambas. Las metodologías deliberativas consultivas se valen generalmente del uso de herramientas estadísticas y modelos lexicográficos.

- **Metodología –Q**

La metodología-Q se aplica para distinguir entre objetivos y estrategias sobre cómo utilizar y aprovechar los recursos físicos y humanos que se encuentran disponibles. Esta metodología permite aclarar perspectivas de un grupo humano, sin necesariamente llegar a ser una muestra representativa de una población. La metodología-Q es recomendada para aplicarse a pequeños grupos de encuestados generalmente entre 12 y 50 (Q-clasificadores) (Swagemakers et al., 2017). En el trabajo realizado por Louah et al. (2017) los autores presentan una descripción de los pasos relevantes en la realización de una investigación mediante la metodología-Q:

Paso 1: desarrollo del proceso: colección de declaraciones de opinión que capturen la gama de subtemas y visiones del mundo que tienen los actores en juego en relación con el tema.

Paso 2: compilación de Q-declaraciones: selección, organización y análisis de las opiniones recogidas en el paso anterior, para extraer un subconjunto de “estados de opinión”. Típicamente se identifican entre 20 a 60 estados.

Paso 3: constitución del set-P: se realiza el muestreo de actores, usualmente entre 12 y 40 personas llamado “Q-clasificadores”.

Paso 4: Q-clasificación: la Q-declaraciones (el subconjunto de estados de opinión) es sometida a la apreciación de cada actor identificado en la Q-clasificadores, quienes aportan una puntuación a cada estado de opinión según la medida de acuerdo o desacuerdo con la opinión. La agregación de las puntuaciones asociadas con “Q-clasificador” constituye su “Q-clasificación”, reflejando su punto de vista sobre un tema.

Paso 5: Q-análisis de Q-clasificación: análisis de correlación, análisis factorial y cálculo de puntuaciones. Inicialmente se construye una matriz de datos, donde las columnas son las puntuaciones de Q-clasificación dado por los actores, las cuales se utilizan como variables, y todas las Q-declaraciones son tomadas como objetivos y se ubican en las filas. Esta matriz es utilizada para aplicarse un análisis de componentes principales (ACP), herramienta de la estadística multivariada.

- Modelos mentales

Morales et al., (2016) llaman a este tipo de modelo “abstracciones selectivas” de diversos aspectos de la realidad, las abstracciones se simulan para ayudar a interpretar las decisiones que se suscitaron hasta llegar a las acciones. Se utiliza la metodología para generar un modelo basado en las opiniones de expertos y en las teorías de las ciencias del comportamiento (Jabbour et al., 2014).

Los modelos mentales son representaciones del mundo que le permiten a un individuo interpretar observaciones, generar inferencias y tomar decisiones. Los modelos mentales individuales se refuerzan o desvirtúan a través de la experiencia y la interacción social. Por ejemplo, los modelos de los campesinos son prácticos y ayudan a explicar la vida cotidiana, a diferencia de los modelos mentales de los expertos científicos, siendo de naturaleza más teórica y científica.

El enfoque de los modelos mentales se ha utilizado como una herramienta para comprender y comparar los conocimientos de expertos y no expertos sobre una variedad de temas. Por ejemplo, permite comprender que el principal obstáculo manejar un peligro como las malezas, no es la falta de inteligencia sino la cantidad limitada de tiempo y atención que un individuo puede brindar a un tema o tarea en particular (Jabbour et al., 2014).

- Análisis heurístico

La teoría de la racionalidad limitada establece que los seres humanos son incapaces de tomar decisiones completamente racionales y deliberativas debido a las limitaciones de tiempo, recursos, atención y memoria. Como consecuencia, los humanos a menudo usan heurísticas basadas en la experiencia, o reglas empíricas, para ayudar a simplificar el proceso de toma de decisiones. El uso de la heurística a menudo implica un procesamiento más deliberado de la información y genera sesgos predecibles cuando se utilizan para tomar decisiones que involucran riesgo, incertidumbre y complejas compensaciones (Jabbour et al., 2014).

- Foto-voz o foto lenguaje

Se utiliza como una herramienta para la valoración participativa, utilizando fotografías, y otras herramientas visuales, para documentar fenómenos sociales o culturales. La idea subyacente es que las imágenes son más efectivas para evocar experiencias e ideas que las palabras escritas (Borbés-Blázquez, 2012). En esta metodología existen variantes importantes, en algunas valoraciones, el investigador proporciona las imágenes sobre las que los participantes discuten. En otros trabajos los investigadores toman sus propias fotografías y en algunos casos los asistentes cuentan sus historias fotografiando sus vidas cotidianas.

Las imágenes son abstracciones que permiten a las personas reflexionar sobre sus propias realidades (Borbés-Blázquez, 2012). La idea que subyace en esta metodología es lograr identificar cuales fenómenos, relaciones, o servicios ecosistémicos son importantes. Condición que provee una perspectiva desde el interior de los grupos sociales sobre el tema. La metodología tiene el potencial de complementar las valoraciones de servicios ecosistémicos en el contexto de comunidades campesinas, permitiendo integrar los conocimientos de diversos actores y la complejidad de los sistemas socioecológicos (Borbés-Blázquez, 2012).

- Sistema basado en conocimiento (o sistema de expertos)

Los sistemas basados en conocimiento asociados al trabajo con expertos, son modelos que facilitan la integración de métodos de análisis cuantitativos y cualitativos. Estos sistemas proveen unas especificaciones lógicas formales para la interpretación de conocimientos, experiencias, datos científicos y datos empíricos disponibles en un área específica de interés. Este tipo de modelos se consideran una aproximación aceptable para la valoración ambiental de servicios ecosistémicos (Ferraro, 2009).

Los modelos basados en sistemas de conocimiento están compuestos generalmente por dos componentes, el primero es un conocimiento base como la opinión de un experto, y el segundo un mecanismo de inferencias para esquematizar las conclusiones. La lógica difusa se ha utilizado frecuentemente para la representación del conocimiento y también como mecanismo de inferencias, gracias a su capacidad para abstraer objetivos ambiguos asociados a niveles deseables o relacionados con atributos claves del sistema (Ferraro, 2009).

- Análisis de redes

En el trabajo realizado por Patten (2010) se describe la técnica de análisis de redes al asociarla con en el esquema transaccional-relacional de la organización de redes. Se considera que la información es relacional, y comparable con las interacciones ecológicas, como la competencia y el mutualismo que no implican conexiones transaccionales entre pares de comportamientos interrelacionados (*i, j*). Cuando una cantidad conservadora, *fij*, se transfiere en un sistema acoplado, un sistema “*i*”, si este gana la cantidad (+ *fij*), el sistema “*j*” pierde exactamente (-*fij*). Todas las transacciones son, por tanto, de suma cero (+ *fij*) + (- *fij*) = 0, tal como lo exige la conservación de la masa y la energía. Este tipo de interacciones de suministro nulo son la base para las relaciones positivas emergentes en la naturaleza y la humanidad.

- Etnografía rápida

En la valoración de servicios ecosistémicos en agroecosistemas, Fajardo (2016) utiliza el proceso metodológico llamado “Etnografía rápida”, en el cual se realiza sistemáticamente la recolección de datos cualitativos mediante el uso de técnicas como entrevistas, discusiones de grupos, observación participante, mapas y modelos sistémicos de finca, flujoigramas de acciones, entre otras. El propósito de este proceso es identificar factores y relaciones críticas, fortalezas y debilidades.

- Preferencias lexicográficas

Según Munda (2004) las preferencias lexicográficas permiten establecer favoritismos frente a criterios y generar procedimientos de agregación. Esta técnica realiza una ordenación de las palabras alfabéticamente, la primera letra representa el primer criterio, la segunda letra el segundo criterio, sin asociar una jerarquización en el proceso de elección. La importancia de los criterios depende del orden que se establezca en su selección.

- Otras herramientas

Villegas-Palacios et al. (2016) identifican una variedad de técnicas que pueden ser aplicadas en los procesos de valoración de servicios ecosistémicos en agroecosistemas, al trabajar con múltiples actores en procesos consultivos o deliberativos:

Workshop: es un espacio colectivo que promueve la participación y la discusión entre diferentes partes interesadas, con objetivos específicos.

Grupos focales: en esta técnica, se selecciona un grupo de personas, las cuales exponen sus opiniones frente a preguntas controversiales. El objetivo es conocer la naturaleza de las opiniones o perspectivas contradictorias.

Tormenta de ideas (brainstorming): es una herramienta que permite obtener información de forma rápida con un grupo personas diversas, las cuales se encuentran directamente relacionadas con un tema específico. Se busca recopilar todas las ideas preliminares, las expectativas y el conocimiento de los participantes.

Entrevistas en profundidad: son entrevistas estructuradas informales que permiten capturar las percepciones, ideas, perspectivas y conocimiento de actores claves.

Línea de tiempo o gráficas históricas: los participantes identifican cambios significativos a través del tiempo, tan antiguos como sea posible. Los cambios son registrados mediante gráficas.

Mapa de actores: se identifican y visualizan los actores claves en los procesos de valoración, sus roles, relaciones, intereses y conflictos.

Cartografía social: es una técnica que permite construir mapas de manera participativa con la comunidad local. Se espacializan las percepciones, los conocimientos, los usos que se dan a los recursos, los conflictos, deterioros, y muchos otros aspectos que sean relevantes para la propia comunidad.

Árboles de problemas: esta técnica provee una visión general e información sobre las causas y efectos de un problema en relación con su entorno y sobre la comunidad.

2.2.4.3 Metodologías de valoración mediante balances energéticos o biofísicos

- Análisis de emergía

El análisis de flujo de energía en un ecosistema es útil para describir las funciones del sistema y es necesario para la planificación de un territorio (Tripathi & Sah, 2001). El análisis de emergía es una metodología desde la termodinámica que se utiliza para evaluar y valorar la sostenibilidad de diferentes procesos ecológicos y económicos (Odum, 1996).

Se define emergía como la energía necesaria para impulsar un proceso o flujo, se incluye en la medición la energía solar y la energía básica de la biosfera. Los procesos o flujos son evaluados mediante balances de energía de entradas y salidas utilizando unidades de energía solar (solar energy, joule, sei). La emergía permite una visión completa de los sistemas en estudio y mide tanto el trabajo de los ecosistemas como el de los humanos en la generación de productos o servicios (Odum, 1996).

El análisis de emergía contempla la realización de un diagrama de energía del sistema, estableciendo sus componentes, flujos de entrada y salida, al igual que sus productos. Posteriormente se aplica un factor de conversión denominado “transformabilidad solar” que se define como la energía solar equivalente necesaria para obtener una unidad de un producto. El

factor de conversión es una medida de la calidad, entendida como la facilidad de obtener beneficio humano de la energía y la eficiencia de la energía, entendida esta última como el menor trabajo requerido por la naturaleza para producir el bien o servicio (Panzieri et al., 2000; Chen et al., 2006).

- Análisis de exergía

Se denomina exergía a la capacidad que tiene un flujo de energía para realizar un trabajo cuando el sistema alcanza un equilibrio con su entorno. Durante el flujo a través de un sistema, como un agroecosistema, la energía sufre transformaciones o conversiones, las cuales hacen que pierda su capacidad, en otras palabras, la energía pierde calidad. Por tanto, al cuantificar la exergía se está midiendo el nivel de valor de una forma de energía (Ferraro, 2008). En el contexto de los agroecosistemas, la exergía puede asociarse con las transformaciones que se generan y que son de utilidad para ofrecer trabajo útil como la producción de alimentos (Ferraro, 2008).

- Análisis de entradas y salidas

Este tipo de análisis se basa en el principio de la conservación de la masa en un sistema estudiado. El método puede ser empleado en el estudio de la valoración de servicios ecosistémicos en agroecosistemas, ya que permite comprender el funcionamiento del sistema y de los flujos con los ecosistemas circundantes. Al aplicar el método de medición de las entradas y salidas de materiales en el agroecosistema, puede identificarse la importancia de un cierto flujo o componente, ya sea por el riesgo de acumulación, contaminación o por el peligro de pérdida o agotamiento de un elemento. De esta manera puede asignarse valor a ciertos flujos o elementos del agroecosistema para favorecer su conservación y así garantizar el funcionamiento del sistema (Ferraro, 2008).

- Análisis de ciclo de vida y evaluación de emergía

La evaluación del ciclo de vida (ACV) en el contexto de los agroecosistemas se centra en el impacto ambiental de las emisiones y los insumos de energía no renovables (Pizzigallo et al., 2008). En este tipo de estudios se analiza el impacto que se genera para la obtención de un producto agrícola en todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción del recurso natural hasta el uso y eliminación del producto. El objetivo principal de ACV es evaluar las necesidades de materiales o energía y las emisiones de un proceso de producción. Los datos se clasifican en categorías de impacto específicas que representan efectos ambientales conocidos. El ACV ignora los aportes dados por los servicios ecosistémicos (Pizzigallo et al., 2008), por tal razón se recomienda integrar el ACV con la metodología de análisis de emergía planteado por Odum (1996).

- Evaluaciones de biodiversidad

Si bien la evaluación de la biodiversidad abarca el estudio de entidades y procesos complejos que incluyen la frecuencia relativa o la abundancia de especies, el número de especies y los procesos que las respaldan, la cuantificación de especies no da cuenta de la importancia o valor de la biodiversidad (Lecq et al., 2017). Por tanto, es relevante integrar en este tipo de evaluaciones los efectos que se dan en la biodiversidad a medida que esta pasa a través de la red trófica y las estructuras organizacionales en diferentes niveles de organización ecológica (es decir, paisaje regional, agroecosistemas, población-especie y genética). Asimismo, autores como Dana et al. (2012) resaltan que no existe un umbral o cantidad de especies que defina la importancia de un individuo, debido a que sus roles cambian a lo largo del tiempo en diferentes estados del ecosistema. Tampoco es acertado establecer “especies clave”, ya que el valor de una especie está marcado más por su relación con las otras especies que por su existencia individual.

- Producción y productividad primaria neta

En las valoraciones económicas desde la economía ecológica se considera el estudio de los procesos internos del agroecosistema, como la respiración, en la cual se toma energía por medio de la fotosíntesis para procesos vitales de la planta. Al restarle la energía de la respiración a la energía fotosintética se obtiene la producción primaria neta, si el resultado es positivo entonces se está acumulando materia en los tejidos vegetales en un área y tiempo dado. Esta productividad neta puede ser aprovechada fuera del agroecosistema al vender la cosecha o forraje, y al interior como fuente de energía para consumidores primarios, herbívoros y la comunidad que gestiona el agroecosistema (Sarandón & Flores, 2014).

- Huella ecológica

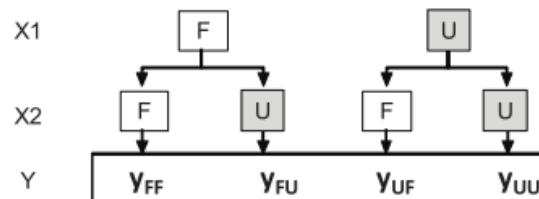
La metodología cuantifica el área necesaria de un territorio (cultivos, pastos, bosques y otros tipos de ecosistemas), para proveer los flujos de materiales y energía requeridos en la producción de un bien o servicio demandado por la sociedad (Sarandón & Flores, 2014). Asimismo, la cantidad de área que se requiere para asimilar los residuos producidos por una comunidad, analizando sus condiciones de vida y hábitos de consumo. Este tipo de análisis en el contexto de la valoración de servicios ecosistémicos, permite comprender la relevancia de los ecosistemas como soporte a los agroecosistemas. Las funciones que se desarrollen al interior del sistema agrícola determinan en mayor o menor medida los flujos con los ecosistemas locales.

2.2.4.4 Metodología de valoración basada en lógica difusa

La lógica difusa y la teoría de conjuntos difusos se utilizan cada vez más en la evaluación de los riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con la gestión del agua y los desechos sólidos, así como en la gestión de la calidad del aire. La lógica difusa también trabaja con otras técnicas como algoritmos genéticos y sistemas de información geográfica (Rodríguez et al., 2016). En el trabajo de Ricou et al. (2014) se describe la lógica difusa de manera general y sencilla, basada en un diseño de un árbol de decisión que se describe a continuación:

Paso 1: diseño de un árbol de decisión (variables de entrada (input), X1, X2, variable de salida (output) Y, con subconjuntos difusos (F favorable y U desfavorable), con Y_{FF} : salida (output) cuando X1 y X2 son favorables (F), Y_{FU} : salida (output) cuando X1 es favorable (F) y X2 es desfavorable (U) (figura 2-15).

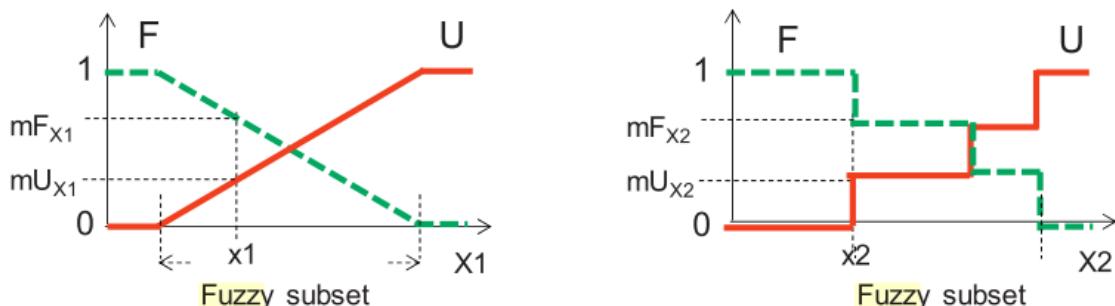
Figura 2-15. Árbol de decisión



Fuente: Ricou et al. (2014)

Paso 2: difuminación, definición de subconjuntos difusos y función de afiliación que calcula el grado de pertenencia de X1 y X2 (tomando el valor x1 y x2) en el conjunto difuso (favorable F y desfavorable U). Un valor de 1 expresa total pertenencia al conjunto difuso (implicando que la pertenencia al otro conjunto es 0) (figura 2-16).

Figura 2-16. Definición de subconjuntos difusos



Fuente: Ricou et al. (2014)

Paso 3: uso de una función de minimización (MIN) para cada regla de cálculo de un grado de afiliación. Por ejemplo, si X1 es F y X2 es U entonces $m_{FU} = \text{MIN}(m_{Fx_1}, m_{Ux_2})$.

Paso 4: de-difuminación, cálculo de un único valor de indicador (I) para el baricentro de los valores de salida (y) ponderados por el grado de pertenencia de cada regla:

$$I = \frac{(y_{FF} \cdot \text{MIN}(m_{Fx_1}; m_{Fx_2}) + y_{FU} \cdot \text{MIN}(m_{Fx_1}; m_{Ux_2}) + y_{UF} \cdot \text{MIN}(m_{Ux_1}; m_{Fx_2}) + y_{UU} \cdot \text{MIN}(m_{Ux_1}; m_{Ux_2}))}{(\text{MIN}(m_{Fx_1}; m_{Fx_2}) + \text{MIN}(m_{Fx_1}; m_{Ux_2}) + \text{MIN}(m_{Ux_1}; m_{Fx_2}) + \text{MIN}(m_{Ux_1}; m_{Ux_2}))}^{\frac{1}{2}}$$

2.2.4.5 Metodología de valoración mediante modelación basada en agentes

En los agroecosistemas existen agentes asociados a los sistemas sociales y ecológicos. Los agentes se caracterizan por evidenciar comportamientos autónomos, de acuerdo con un conjunto de reglas, también tienen la capacidad de interactuar localmente y con agentes vecinos. Las interacciones pueden ser simples y locales, también logran trascender a conductas o patrones más complejos, escalando hasta niveles globales. Los modelos basados en agentes logran abstraer la información necesaria para comprender las normas subyacentes a los comportamientos de los agentes y sus interacciones (Zhang et al., 2008).

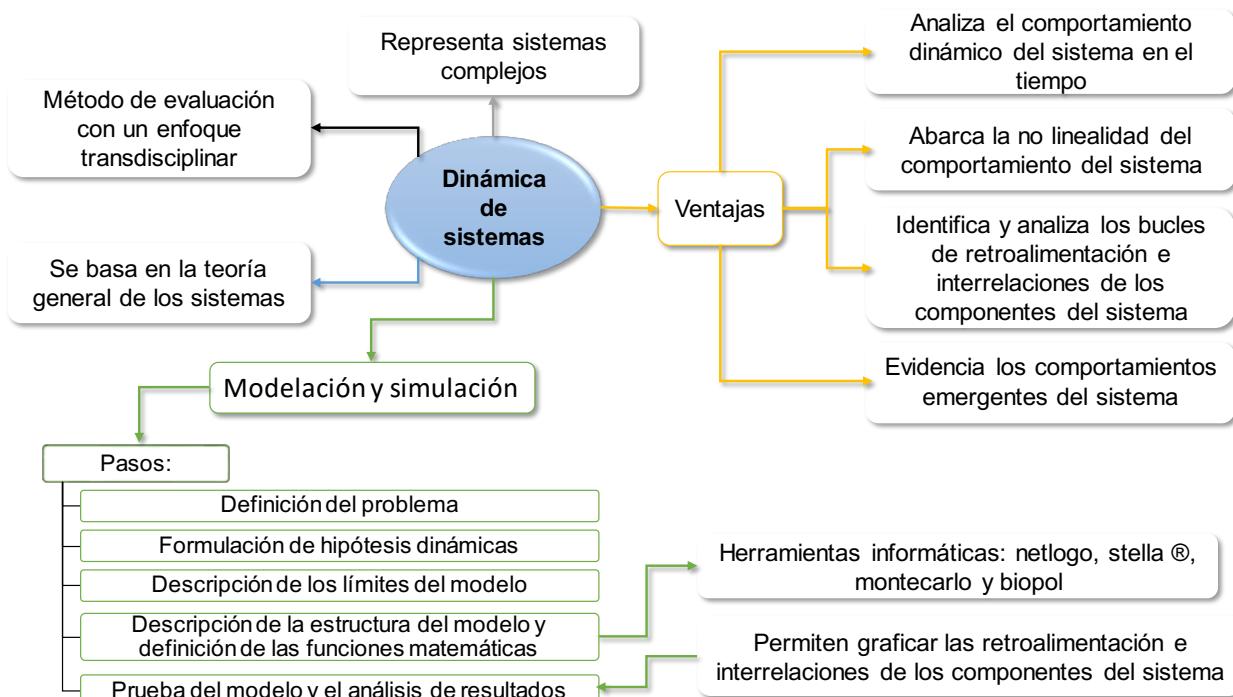
La modelación basada en agentes permite explorar las interacciones entre estructuras de nivel micro y macro. Por ejemplo, el nivel del agroecosistema y su entorno. En este modelo se inicia con la comprensión de las reglas simples que gobiernan las interacciones entre estructuras, componentes y procesos en el agroecosistema, posteriormente se estudian las respuestas de los sistemas sociales y naturales, con lo cual se pueden llegar a identificar patrones espaciales emergentes o retrasos.

En este tipo de modelación se estudia cómo los procesos de nivel micro afectan los resultados a nivel macro dentro de los sistemas socioecológicos que son complejos, impredecibles, adaptativos y que a menudo evolucionan de forma no lineal (Mialhe et al., 2012). Mediante este tipo de análisis, se pueden comprender los niveles de importancia de las interrelaciones que se desarrollan en el agroecosistema y que permiten la generación de servicios ecosistémicos, con lo cual pueden valorarse servicios que difícilmente son evidentes al aplicar otras metodologías.

2.2.4.6 Metodología de valoración mediante modelación en dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas (DS) es una metodología de modelación que analiza el comportamiento dinámico en el tiempo, establece y formaliza las relaciones entre los flujos de información, materia o energía y las estructuras del sistema (Forrester, 2013). La DS es reconocida como un método de evaluación con enfoque transdisciplinario que se basa en la teoría general de los sistemas, abarcando su “no linealidad” (Forrester, 2013). Según Halog y Manik (2011) la modelación basada en dinámica de sistemas, facilita la identificación por medio de diagramas causales de las interdependencias entre los micro, meso y macrosistemas, posibilita la observación de la estructura y comportamientos emergentes, permitiendo el análisis global, representando y modelando las variables relevantes.

Figura 2-17. Mapa conceptual sobre el modelamiento en dinámica de sistemas



Fuente: autor (2018) basado en Forrester (2013) y Musango (2012)

El enfoque de dinámica de sistemas aporta en la comprensión de los agroecosistemas al analizarlos como sistemas complejos. Permite el estudio de la estructura endógena de un agroecosistema en particular, la identificación de las interrelaciones de los diferentes elementos, y las alternativas para la simulación y explicación de los cambios que pueden influenciar tanto la promoción de los SE como su valoración (Musango, 2012). En la figura 2-17 se describen las principales características, ventajas y pasos de la modelación en DS.

- Análisis del riesgo ecológico

El análisis de riesgo ecológico es una evaluación estructurada de las amenazas a las especies, las comunidades naturales y los procesos del ecosistema a partir de contaminantes y sustancias tóxicas. Permite analizar situaciones estresantes causadas por especies invasoras, organismos genéticamente modificados y agentes de control biológico (Dana et al., 2012). La información

generada en este tipo de análisis puede ser integrada con la modelación basada en dinámica de sistemas, estableciendo las influencias y analizando las causalidades generadas al presentarse diversas amenazas para la generación de servicios ecosistémicos.

- Análisis de escenarios

La metodología de valoración basada en dinámica de sistemas hace parte de los modelos formales al utilizar algoritmos matemáticos para representar las relaciones entre los sistemas humanos y ecológicos. El modelado cuantitativo se usa a menudo para el análisis predictivo, a medida que la complejidad aumenta y el horizonte temporal de interés es más lejano, es más importante incluir el análisis de escenarios (Swart, Raskin & Robinson, 2004).

El comportamiento de los sistemas que se desea modelar puede ramificarse en múltiples rutas futuras. En el análisis de escenarios se captan factores que influyen en el futuro, como cambios y eventos en el sistema, o aspectos difícilmente cuantificables, explicando la importancia de los factores cualitativos que determinan el desarrollo, como valores, cambios culturales y características institucionales, ampliando la comprensión del modelado matemático (Swart, Raskin & Robinson, 2004).

- Modelo analítico de sistemas

Este modelo se basa en un enfoque jerárquico de la información que se fundamenta en datos experimentales sobre la dinámica del sistema social y ecológico analizado. El enfoque jerárquico de la información implica que los sistemas evolutivos desarrollados, incluidos los biológicos, ecológicos y sociales, tienen una organización jerárquica, donde todos los sistemas evolutivos de la biosfera son sus componentes, y pertenecen a uno de los niveles jerárquicos de su organización, tienen un ciclo típico de operación e incluyen uno o más procesos básicos específicos (Kirsta, 2006).

En el estudio de Kirsta (2006) se describe como cada nivel de jerarquía requiere ciclos de tiempo que determinan unos ritmos ambientales necesarios para la autoorganización, a mayores niveles de alteración del sistema, mayores tiempos se requieren. Las alteraciones son modeladas por este tipo de análisis, permitiendo valorar los componentes del sistema que aportan en mayor medida a la estabilidad.

2.2.4.7 Comparación de metodologías de valoración

Basado en los 63 documentos identificados en la tabla 2-3, se realiza una comparación de las seis metodologías de valoración desde la economía ecológica. En cuanto a su capacidad para incorporar aspectos como: interrelaciones entre dimensiones (ID), sinergias y comportamientos emergentes (SyCE) en el agroecosistema como sistema complejo, capacidad de integrarse con otras metodologías de valoración (IM), incorporación de análisis cualitativos y cuantitativos (IACC), articulación entre los principios y criterios de valoración aportados desde la agroecología y la economía ecológica (PC), realización de análisis de sensibilidad (AS), uso de software para modelación de sistemas complejos (US) y finalmente la capacidad de valoración de servicios ecosistémicos (CVSE) derivados de las funciones de hábitat (H), regulación (R), producción (P) e información (I).

En la comparación se definen tres niveles de capacidad para incluir los aspectos mencionados anteriormente. Los niveles son: alto, medio y bajo, utilizando los colores negro, gris y blanco

respectivamente, los niveles se establecieron considerando el número de documentos que aplicaron los aspectos evaluados. La comparación es presentada en la tabla 2-4.

Tabla 2-4. Comparación de metodologías de valoración

Interrelaciones entre dimensiones (ID), sinergias y comportamientos emergentes (SyCE) en el agroecosistema como sistema complejo, capacidad de integrarse con otras metodologías de valoración (IM), incorporación de análisis cualitativos y cuantitativos (IACC), principios y criterios de valoración aportados desde la agroecología y la economía ecológica (PC), análisis de sensibilidad (AS), uso de software para modelación (US) y finalmente la capacidad de valoración de servicios ecosistémicos (CVSE) derivados de las funciones de hábitat (H), regulación (R), producción (P) e información (I).

Metodologías de valoración	ID	SyCE	IM	IACC	PC	AS	US	H	R	P	(CVSE) I
Multicriterio											
Deliberativa – consultiva											
Balances energéticos y biofísicos											
Lógica difusa											
Basada en agentes											
Dinámica de sistemas											

Fuente: autor (2018)

La metodología de valoración mediante modelación en dinámica de sistemas presenta mayor capacidad para incorporar los aspectos de selección especificados en la tabla 2-4. Por tanto, se selecciona para ser aplicada en esta investigación.

La DS permite involucrar principios y criterios de valoración aportados desde la agroecología y la economía ecológica, incorporando el análisis multicriterio, al igual que información cuantitativa asociada a balances energéticos o biofísicos, convirtiéndose en una propuesta de integración metodológica. La metodología de valoración basada en DS como afirma Rozo y da Luz Reis (2003) permite analizar la aparición de propiedades emergentes a través de ciclos causales. Propiedades derivadas de relaciones y conexiones entre los servicios ecosistémicos, el agroecosistema y su entorno.

La metodología permite modelar comportamientos no lineales, estableciendo los niveles de sensibilidad del sistema a cambios externos mediante el análisis de escenarios, identificando umbrales en el flujo de los servicios ecosistémicos (Limborg, O'Neill, Costanza & Farber, 2002). La dinámica de sistemas tiene la capacidad de integrar las cinco dimensiones de valoración analizadas en el numeral 1.3. La metodología en DS permite estudiar las relaciones que configuran el valor multidimensional de los servicios ecosistémicos.

2.2.5 Dinámica de sistemas en valoración de SE en agroecosistemas

La dinámica de sistemas se ha implementado como metodología de modelación en temáticas como: modelos económicos y ecosistemas (Bockstael et al., 1995), ciclos de fertilización y rotación de cultivos (Seppelt, 2000), dinámica de la materia orgánica (Fu et al., 2000), uso de la tierra y servicios ecosistémicos (Portela & Rademacher, 2001), análisis de escenarios y políticas de uso de la tierra (Musacchio & Grand, 2002), agroecosistemas y sostenibilidad (Belcher, Boehm & Fulton, 2004), agricultura ecológica (Shi & Gill, 2005), dinámica de humedad en suelos agrícolas (Kirsta, 2006), vulnerabilidad a cambio climático (Dougill et al., 2010), políticas y conservación de

humedales (Jogo & Hassan, 2010), agroecosistemas cafeteros (Abaunza et al., 2011), arborización y ozono troposférico (Manes et al., 2012), servicios ecosistémicos y desarrollo socioeconómico (Vidal-Legaz et al., 2013), agroecosistemas cafeteros y variabilidad climática (Díaz-Manrique, 2014), simulación de sistemas pecuarios (Gómez, Andrade & Vásquez, 2015), sustentabilidad de la producción de biodiesel en cultivos de palma (Bautista et al., 2016), agricultura y huella ecológica (Hanna et al., 2016), sostenibilidad de recursos hídricos para riego (Ferreira et al., 2016), control biológico de plagas (Daniels et al., 2017) entre otros. Las temáticas anteriormente descritas reflejan la flexibilidad y capacidad de integración analítica de la metodología de valoración en DS con la complejidad de los agroecosistemas.

Bockstael et al. (1995) en su trabajo titulado “*Ecological economic modeling and valuation of ecosystems*” mediante la utilización integrada de SIG y Stella®, realizan una modelación de la dinámica ecológica y económica en un marco paisajístico. Se analizan regulaciones y procesos humanos de toma de decisiones y como las diferentes opciones de política pueden reconfigurar el valor de la tierra, además de los efectos de la reconfiguración del paisaje por usos agrícolas sobre los valores no comercializados de los ecosistemas. Como conclusiones del trabajo desarrollado, Bockstael et al. (1995) resaltan la importancia de modelar las consecuencias de las políticas implementadas sobre los recursos a largo plazo y las interacciones entre el comportamiento humano y los procesos ecológicos en términos de bienestar.

Seppelt (2000) en su artículo científico “*Regionalised optimum control problems for agroecosystem management*” utiliza dinámica de sistemas y SIG, como metodología para determinar los ciclos de fertilización y de rotación de cultivos a nivel regional en diferentes escalas de tiempo. El trabajo identifica unidades homogéneas para apoyar el proceso de toma de decisiones en agricultura de precisión en la región de Niedersachsen (Alemania), el modelo integra la variabilidad espacial con la gestión agrícola. Los resultados más sobresalientes del modelo se relacionan con la optimización de la estrategia de gestión de los ciclos de fertilización y la rotación de cultivos, teniendo en cuenta la variabilidad de suelos y las proyecciones en el tiempo mediante la integración de modelos de simulación agroecológica y bases de datos espaciales.

Fu et al. (2000) en su trabajo titulado “*Soil carbon dynamics of conventional tillage and no-till agroecosystems at Georgia Piedmont—HSB-C models*” emplean el software Stella® para simular la dinámica de la materia orgánica y el cambio de la biomasa en el suelo en agroecosistemas con labranza convencional y con métodos de labranza mínima. El trabajo incluye tendencias de las poblaciones de microrganismos y lombrices a la aplicación de los diferentes tipos de labranza, identificando cambios en los grupos estudiados y su relación con la velocidad de descomposición de la materia orgánica.

Portela y Rademacher (2001) en su trabajo denominado “*A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the brazilian amazonia to provide ecosystem services*” desarrollan un modelo basado en dinámica de sistemas para determinar cómo los diferentes patrones de uso de la tierra degradan el valor de los servicios de los ecosistemas. El modelo incluye en su análisis cuatro aspectos como son las causas de la deforestación, el uso y cobertura del suelo, la valoración de los ecosistemas y de los SE. El modelo planteado por Portela y Rademacher (2001) involucra los incentivos económicos y sociales que tienen los pequeños agricultores y los grandes inversores ganaderos para destruir el bosque. También se considera cómo los patrones de sucesión forestal y la biomasa asociada, difieren según el tipo de uso dado a la tierra que fue obtenida de la deforestación. Los usos de la tierra a su vez tuvieron gran impacto en la calidad de los SE provistos.

Portela y Rademacher (2001) valoran los SE de acuerdo con un valor monetario de referencia, el modelo calcula el cambio en estos valores de acuerdo con las prácticas de uso del suelo que se producen con el tiempo. El modelo explora los usos agrícolas y ganaderos de la amazonia brasileña y los efectos que estas prácticas tienen en los servicios y funciones de los ecosistemas mediante el software de modelación Stella®.

Los investigadores Portela y Rademacher (2001) establecen que el modelo basado en dinámica de sistemas involucra la elaboración de procesos y patrones socioeconómicos y ecológicos, además facilita la identificación de vínculos y retroalimentaciones importantes entre las actividades humanas y los impactos ecológicos. El modelo permite establecer ecuaciones para describir comportamientos de los elementos involucrados, las causas de la deforestación, el uso y cobertura del suelo y la valoración de los ecosistemas y SE. Portela y Rademacher (2001) resaltan como el modelo basado en DS, es un punto de partida para futuras discusiones e investigaciones encaminadas a encontrar maneras útiles de describir el daño generado en los ecosistemas y en los SE que proveen y como esta herramienta puede ser usada en procesos de toma de decisiones para el manejo de ecosistemas.

Musacchio y Grant (2002) en su trabajo “*Agricultural production and wetland habitat quality in a coastal prairie ecosystem: simulated effects of alternative resource policies on land-use decisions*” analizan escenarios para simular el efecto de las políticas de subsidios sobre las decisiones de uso de la tierra de los agricultores de arroz y el posterior impacto sobre el hábitat del ganso nival (*Anser caerulescens caerulescens*). El modelo desarrollado permite predecir cambios en el uso del suelo, la producción agrícola, la viabilidad económica de las granjas y la calidad del hábitat. El análisis de escenarios determina que las políticas podrían diseñarse incluyendo la importancia de valores de uso indirecto de los humedales (hábitat de la fauna y calidad del agua) y los valores de existencia (biodiversidad, historia y cultura) para mantener la producción agrícola y conservar el hábitat del ganso nival.

Belcher, Boehm y Fulton (2004) en su trabajo titulado “*Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach*” desarrollan un modelo de simulación para evaluar las diferencias de sistemas de producción agrícola en Askatchewan (Canadá), utilizando una serie de indicadores de sostenibilidad. Se identifica como la sostenibilidad de los agroecosistemas debe contemplar la dinámica de múltiples componentes (económicos, biológicos y físicos). El modelo aporta información de las opciones de producción en un contexto biofísico específico, información requerida para el desarrollo de políticas centradas en la sostenibilidad de los agroecosistemas.

Shi y Gill (2005) desarrollaron el trabajo titulado “*Developing effective policies for the sustainable development of ecological agriculture in China: the case study of Jinshan county with a systems dynamics model*” mediante un modelo basado en dinámica de sistemas para explorar las interacciones ecológicas, económicas, institucionales y sociales del desarrollo agrícola ecológico a través de un estudio de caso del condado de Jinshan en China. Analizando los posibles escenarios de aplicación de políticas alternativas en la agricultura.

Shi y Gill (2005) concluyen que las principales estrategias para favorecer la sostenibilidad de la agricultura ecológica están relacionadas con la diversificación de patrones de uso de la tierra, los préstamos gubernamentales con bajo interés y la capacitación de los agricultores. Además, identifican como obstáculos para la sostenibilidad, la limitada disponibilidad de información, la aversión al riesgo de los agricultores y los elevados costos de implementación de este tipo de agricultura.

Shi y Gill (2005) resaltan la combinación del marco analítico de la economía ecológica con la modelación en dinámica de sistemas. Combinación que se constituye en una herramienta para simular y analizar, por un lado, las políticas sobre agricultura ecológica, y, por otro lado, establecer una base sólida para la formulación de políticas que promuevan la sostenibilidad de los sistemas agrícolas a nivel regional.

Kirsta (2006) en su trabajo titulado “*General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems*” desarrolla un modelo para determinar los procesos responsables del intercambio de humedad en los suelos de un área productora de granos y la dinámica de humedad en suelos congelados. El modelo permite rastrear el contenido de humedad disponible en diferentes estratos, mediante la utilización de datos sobre la precipitación mensual y la temperatura media mensual. El modelo permite determinar zonas con mejor potencial para cultivos en condiciones de temperatura extrema.

Dougill et al. (2010) en el trabajo titulado “*Anticipating Vulnerability to Climate Change in Dryland Pastoral Systems: using Dynamic Systems Models for the Kalahari*” analizan las presiones externas que afectan la vulnerabilidad de los sistemas de pastoreo de tierras secas en el Kalahari. Evalúan aspectos como: la capacidad de adaptación de las comunidades a la sequía, la resiliencia del ecosistema y la gobernanza sociopolítica. El trabajo se apoyó en la investigación participativa con las comunidades del Kalahari, se emplearon diagramas de bucles causales y modelos de sistemas dinámicos para expresar y establecer escenarios futuros, identificando las incertidumbres del sistema y la sensibilidad al cambio.

Dougill et al. (2010) concluyen que las políticas gubernamentales han favorecido a los ganaderos más ricos aumentando la vulnerabilidad de los más pobres al cambio climático, inclusive períodos cortos de sequía pueden causar impactos en la subsistencia de las comunidades de bajos recursos. Se resalta que un mejor acceso a los mercados y el fortalecimiento de las organizaciones comunales pueden reducir la vulnerabilidad. El intercambio de conocimientos y prácticas de gestión entre los propietarios de tierras privadas y las comunidades vulnerables pueden ayudar a reducir la pobreza y la calidad de vida en el Kalahari, al permitir el acceso de estas comunidades a herramientas de monitoreo que les permitirán gestionar el ganado de acuerdo con la disponibilidad de forraje en las tierras secas.

Jogo y Hassan (2010) desarrollan un modelo ecológico - económico basado en la metodología de dinámica de sistemas bajo el software Stella®, para simular los impactos de las políticas sobre el funcionamiento de los humedales y el bienestar económico. Trabajo titulado “*Balancing the use of wetlands for economic well-being and ecological security: the case of the Limpopo wetland in southern Africa*”. Jogo y Hassan (2010) resaltan que uno de los principales obstáculos para la ordenación sostenible de los humedales consiste en el desconocimiento de las consecuencias de la ordenación y de las políticas sobre el funcionamiento de los humedales, los servicios ecosistémicos y el bienestar humano.

Como resultado de las simulaciones el modelo sugiere que las políticas aplicadas a los humedales en relación con las concesiones de explotación, tienen gran impacto en los servicios de abastecimiento directo (producción de cultivos y recolección de recursos naturales). Además, las intervenciones políticas para mejorar la rentabilidad del cultivo sin aumentar la productividad, mediante el apoyo a los precios de la producción agrícola y/o la subvención de los precios de los insumos, reducen las acciones de conservación de los humedales que sufren una mayor presión por la explotación económica (Jogo & Hassan, 2010).

Como alternativa para la conservación de los humedales, el modelo resalta que se debe promover la diversificación de los medios de subsistencia y las opciones de ingreso no agrícola, para reducir la presión sobre los humedales y mejorar la gestión sostenible de los mismos. La diversificación de los medios de subsistencia puede respaldarse mediante un aumento de las inversiones gubernamentales en infraestructuras rurales, cadenas de valor, salud y educación.

Por otra parte, se deben generar estrategias de adaptación al cambio climático como la recolección y el almacenamiento del agua, métodos de riego eficientes, el fomento del uso de cultivos tolerantes a la sequía y la diversificación de la agricultura (Jogo & Hassan, 2010). El modelo de simulación refleja que es imperativo avanzar más allá de los servicios de los humedales considerados en el estudio (producción de cultivos y recolección de biomasa) e incluir los servicios de aprovisionamiento y regulación.

Abaunza et al. (2011) en su trabajo “*Simulación de estrategias de inversión para pequeños caficultores colombianos*” analizan las consecuencias de la volatilidad y las fluctuaciones del precio del café en la calidad de vida de los pequeños agricultores. El modelo emplea la dinámica de sistemas para el análisis a largo plazo de estrategias y escenarios de precios del café, concluyendo que existe una alta dependencia de los ingresos de los caficultores con la disponibilidad de tierras para cultivo. Abaunza et al. (2011) resaltan que la sensibilidad del precio del café requiere la implementación de estrategias como: la renovación de cafetales cada 6 años para mantener la productividad, la diversificación de cultivos para reducir la dependencia del café y el aumento de los ingresos con productos alternativos. Abaunza et al. (2011) resaltan que la metodología de dinámica de sistemas permite tener en cuenta la retroalimentación del sistema y el análisis de escenarios.

Manes et al. (2012) realizan un modelo integrado en dinámica de sistemas, análisis espacial y geoestadístico para evaluar los efectos de la diversidad de árboles en la eliminación del ozono troposférico (O_3) en la ciudad de Roma (Italia). Trabajo titulado “*Urban ecosystem services: tree diversity and stability of tropospheric ozone removal*”. Manes et al. (2012) especifican como los bosques urbanos en la ciudad de Roma proporcionan importantes servicios ecosistémicos, principalmente la mejora de la calidad del aire mediante la eliminación de contaminantes. Sin embargo, el trabajo evidencia que, a pesar del conocimiento existente sobre la fisiología, la abundancia y la distribución de los árboles dentro de las ciudades, no se ha investigado específicamente su efecto en la magnitud y la eficiencia en la remoción de la contaminación atmosférica.

En un contexto rural, Vidal-Legaz et al. (2013) desarrollan el trabajo titulado “*Trade-offs between maintenance of ecosystem services and socio-economic development in rural mountainous communities in southern Spain: a dynamic simulation approach*”. Vidal-Legaz et al. (2013) mediante un modelo de simulación en dinámica de sistemas, calculan “trade-offs” o compensaciones entre las provisiones de dos servicios ecosistémicos, el valor estético del paisaje y el suministro de agua para uso humano, incluyendo el desarrollo económico asociado con diferentes cambios en el uso de la tierra.

El estudio se desarrolla en el sector montañoso del sur de España, específicamente en los municipios de Abla y Abrucena. Vidal-Legaz et al. (2013) resaltan como tradicionalmente las comunidades rurales montañosas han administrado sus tierras extensamente, generando usos que proporcionan servicios ecosistémicos importantes para las áreas rurales y urbanas. Sin embargo, en las últimas décadas, las comunidades han sufrido cambios drásticos en la estructura económica, el tamaño de la población y el uso de la tierra. La intensificación del uso de la tierra genera un impacto negativo, tanto en el suministro de agua como en las características del paisaje.

Díaz-Manrique (2014) desarrolla un modelo en dinámica de sistemas con el objetivo de comprender el comportamiento productivo de un agroecosistema cafetero, a partir de las interacciones que surgen entre su estructura y la variabilidad climática. Trabajo titulado “*Estudio de la variabilidad climática y los agroecosistemas cafeteros desde la dinámica de sistemas*”. El modelo incluye la estructura de una finca cafetera, la variabilidad climática como problema principal, las interacciones entre el sistema ecológico y el sistema cultural y los posibles cambios en los elementos analizados a lo largo del tiempo. El trabajo resalta la importancia de la dinámica de sistemas para modelar el comportamiento, las interrelaciones y los posibles escenarios en un sistema complejo, constituido por una finca cafetera en el municipio de Anolaima (Cundinamarca).

Gómez, Andrade y Vásquez (2015) desarrollan una propuesta metodológica para la toma de decisiones, en administración e investigación de procesos agropecuarios, soportada en dinámica de sistemas, denominada “Lineamientos metodológicos para construir ambientes de aprendizaje en sistemas productivos agropecuarios soportados en dinámica de sistemas”. La propuesta establece lineamientos para orientar la construcción de modelos matemáticos (software AgroDisi) para la experimentación simulada de sistemas del sector agropecuario como el bovino, porcino, caprino y cunícola. Gómez et al. (2015) concluyen que el modelado de sistemas productivos pecuarios bajo la metodología de dinámica de sistemas permite comprender su complejidad.

Bautista et al. (2016) en su trabajo titulado “*Biodiesel-TBL+: a new hierarchical sustainability assessment framework of PC&I for biodiesel production*” realizan una evaluación de la sostenibilidad en la producción de biodiesel en Colombia. En el trabajo se analizan los cultivos de palma africana mediante dinámica de sistemas, para proponer una estructura jerárquica de evaluación que integra las dimensiones del desarrollo sostenible. El modelo permite establecer el impacto de la producción de biocombustibles en Colombia y definir estrategias de soberanía y diversificación energética.

Hanna et al. (2016) en su trabajo titulado “*Ecological Agro-ecosystem Sustainable Development in Relationship to Other Sectors in the Economic System, and Human Ecological Footprint and Imprint*” analizan la huella ecológica humana. El trabajo incluye las capacidades ecológicas globales y la disponibilidad de recursos para la agricultura, los impactos de los avances tecnológicos en la producción agrícola y la importancia de los agroecosistemas en las dimensiones ecológica, económica y social. El modelo desarrollado con proyección al año 2050 muestra que la producción agrícola podría tener una deficiencia del 140%, como consecuencia de la pérdida de insumos productivos generados por los ecosistemas y el crecimiento global de la población.

Ferreira et al. (2016) en su trabajo titulado “*Temporal Dynamic Modeling for the Assessment of Water Availability and its Effects on Sustainability of Water Resources at Boi Branco Sub-basin, SP, Brazil*” emplean la dinámica de sistemas (DS) para evaluar la sostenibilidad de los recursos hídricos en la subcuenca de Boi Branco durante un período de 10 años (2011-2021). En el área de estudio se realiza agricultura de riego, el modelo determina el suministro de agua incluyendo variaciones de la precipitación y la eficiencia del sistema de riego. Los resultados de los escenarios planteados determinan que la demanda de agua es mayor que el suministro potencial de agua superficial, permitiendo clasificar la condición de la subcuenca como crítica. Se plantean alternativas como el uso de las aguas subterráneas y la mejora en la eficiencia de los sistemas de riego. El modelo genera información sobre las tendencias futuras en el uso del agua, las cuales pueden apoyar la toma de decisiones con respecto a las políticas y la gestión de la intervención hídrica, aspectos claves para garantizar la sostenibilidad y el uso racional, así como para promover la responsabilidad social.

Daniels et al. (2017) en su trabajo “*Monetary Valuation of Natural Predators for Biological Pest Control in Pear Production*” realizan un modelo ecológico para simular las interacciones entre especies depredadoras y su beneficio económico en un agroecosistema. El modelo atribuye un valor a la diversidad de especies y sus beneficios para el control biológico. El trabajo aporta argumentos para la conservación de la biodiversidad a través de la valoración monetaria de su función ecológica, valores que pueden ser usados en la formulación de políticas para incluir la pérdida de biodiversidad, su importancia en la producción de alimentos y la mejora de los ingresos del agricultor en los análisis económicos.

En los estudios mencionados anteriormente se plantean modelos de simulación con el propósito de analizar el comportamiento, estructura y funciones de los agroecosistemas, identificando y analizando las relaciones con las dimensiones ecológica, sociocultural, económica, política y tecnológica. Sumado a lo anterior, al aplicar la metodología de dinámica de sistemas, se plantean escenarios y se analizan las respuestas del agroecosistema a los cambios modelados. De este tipo de análisis los autores logran identificar factores que potencializan o dificultan el desarrollo de un agroecosistema sostenible y su nivel de sensibilidad a cambios específicos. Los estudios se constituyen en una base científica para apoyar la toma de decisiones políticas, económicas y productivas entorno a los agroecosistemas y los SE generados.

Existe un importante potencial de investigación sobre la valoración de SE en agroecosistemas utilizando la metodología de dinámica de sistemas. Los modelos generados bajo esta metodología permiten establecer los aspectos que causan el deterioro de los SE y, por ende, la pérdida de valor. La metodología permite la identificación de las relaciones y retroalimentaciones entre las decisiones políticas, las acciones humanas y la transformación o menoscabo de los SE, generando información relevante para su preservación. Las relaciones identificadas pueden ser descritas mediante ecuaciones, funciones o gráficas.

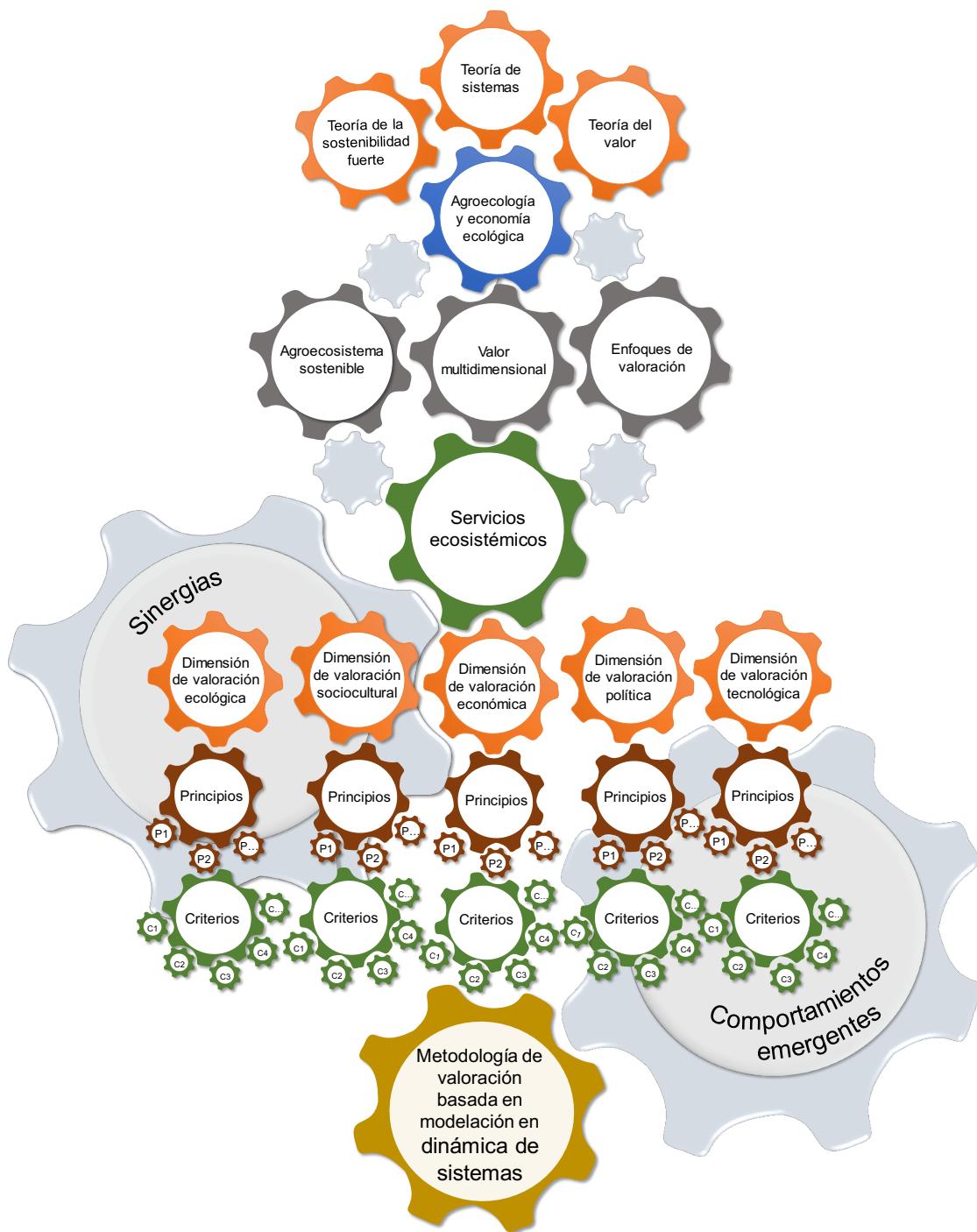
La dinámica de sistemas permite desarrollar análisis cuantitativos y cualitativos, proyección de escenarios, determinación de variables críticas, inclusión del análisis multicriterio, modelamiento matemático, utilización de software para análisis de comportamientos emergentes y sinergias. Características que permiten generar conocimiento relevante en los procesos de toma de decisiones y para las comunidades que se benefician de la valoración de los SE.

2.3 Marco de valoración de SE en agroecosistemas sostenibles

Considerando la necesidad de establecer aportes metodológicos para los procesos de toma de decisiones sobre los servicios ecosistémicos, la presente investigación propone un marco de valoración desde la agroecología y la economía ecológica, basado en la articulación de las bases teóricas y conceptuales, los enfoques de valoración, el concepto de agroecosistema sostenible y el valor multidimensional.

Los agroecosistemas sostenibles tienen el potencial de generar SE al ser diseñados y manejados desde una visión sistémica, implementando los macroaspectos de sostenibilidad y aportando al bienestar de las comunidades. Al generarse los SE, los enfoques de valoración y las dimensiones del valor, permiten identificar su importancia. El valor de los SE es utilizado en los procesos de toma de decisiones sobre la gestión de los agroecosistemas, de manera que se garantice la provisión de los SE valorados.

Figura 2-18. Marco de valoración de SE en Agroecosistemas Sostenibles



Fuente: autor (2018)

En la determinación de la multidimensionalidad del valor de los SE, se proponen principios y criterios para cada una de las dimensiones analizadas. El análisis de relaciones (anexo A) determina que estos principios y criterios se encuentran interrelacionados de manera que, al aplicar un principio o un criterio, se potencian en mayor o menor medida las funciones y servicios ecosistémicos correlacionados y sus dimensiones de valoración. Es decir, se evidencia la sinergia

existente, la cual se manifiesta de forma positiva, el aumento en el suministro de un servicio ecosistémico generado por la aplicación de los principios y criterios, potencia el suministro de otros servicios y su valoración multidimensional. Con los aportes teóricos y metodológicos antes referenciados se propone un marco de valoración de SE en agroecosistemas (figura 2-18).

La implementación del marco de valoración requiere de metodologías que permitan integrar los enfoques con el valor multidimensional. Condición que plantea importantes retos metodológicos que deben ser abordados por la agroecología y la economía ecológica, donde se debe incluir la “no linealidad”, las sinergias, los comportamientos emergentes, las interrelaciones, las causalidades y demás aspectos que sólo desde la modelación del agroecosistema como sistema complejo es posible analizar. En la tabla 2-5 se describen los principales hallazgos de la revisión documental, identificando condiciones actuales y condiciones ideales de las metodologías de valoración de SE y su relación con los enfoques de valoración.

Tabla 2-5. Características de las metodologías de valoración de SE en agroecosistemas

Enfoques de valoración	Características actuales	Características ideales
Interdisciplinar	Aproximaciones disciplinares, se usan independientemente los análisis energéticos, balances de entradas y salidas, análisis de escenarios, modelos mentales, etnografía, preferencias lexicográficas, entre otros.	Integra metodologías y herramientas de modelación de sistemas complejos. Realiza análisis de sensibilidad.
Sistémico	Aproximaciones parciales de los subsistemas, componentes y procesos en el agroecosistema.	Analiza el agroecosistema como sistema complejo. Evidencia y modela las sinergias y comportamientos emergentes ligados a la provisión de SE.
Ecológico	Valoran algunos SE, en mayor medida de producción y regulación.	Valora los servicios ecosistémicos derivados de las funciones de hábitat, regulación, producción e información.
Multidimensional	Baja integración de las cinco dimensiones del valor.	Integra las dimensiones ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política. Incorpora indicadores cualitativos y cuantitativos asociados a los principios y criterios de valoración.
Participativo	Reducida integración del conocimiento de las comunidades con el conocimiento científico en la valoración de los SE. Baja comprensión de las relaciones entre los SE y el bienestar de las comunidades.	Incluye los conocimientos, experiencias y prácticas de las comunidades con el conocimiento científico en los procesos de valoración. Evidencia la importancia o valor que tienen los SE para el bienestar de las comunidades.

Fuente: autor (2018)

Considerando las características de las metodologías de valoración de SE en agroecosistemas, descritas en la tabla 2-3, la metodología basada en la modelación en dinámica de sistemas es la que presenta mejores potencialidades para implementar el marco de valoración propuesto. La dinámica de sistemas, en primera instancia, permite involucrar el análisis multicriterio y los balances energéticos o biofísicos. En segunda instancia, a través de ciclos causales permite analizar las propiedades emergentes, las relaciones y conexiones entre los servicios ecosistémicos, el agroecosistema y el entorno. En tercera instancia, modela comportamientos no lineales propios de los ecosistemas y los agroecosistemas, establece niveles de sensibilidad a cambios externos, identifica umbrales de cambio en el flujo de los servicios ecosistémicos y analiza escenarios (Díaz-Manrique, 2014). En cuarta instancia, integra las cinco dimensiones de valoración propuestas por esta investigación.

3. Metodología de valoración de SE mediante modelación en dinámica de sistemas

La metodología de valoración propuesta en esta investigación se basa en la modelación en dinámica de sistemas, la cual permite representar las interrelaciones, dependencias y causalidades entre las dimensiones, principios y criterios de valoración de los SE. A través de la implementación de los pasos metodológicos, se logrará formalizar el modelo de valoración de SE. En la simulación se espera visualizar los comportamientos emergentes propios de un sistema complejo.

La metodología de modelación en dinámica de sistemas consta de siete pasos generales (Abaunza et al., 2011; Forrester, 2013; Ferreira et al., 2016; Espinoza, Bautista, Narváez, Alfaro, & Camargo, 2017). El primer paso es la articulación del problema y su conceptualización. El segundo paso es la formulación de las hipótesis dinámicas parciales mediante la definición de ciclos causales por cada dimensión de valoración. El tercer paso es la definición del modelo general de valoración, el cual integra los ciclos causales parciales de cada dimensión. El cuarto paso es la definición del agroecosistema tipo. El quinto paso es la formalización del modelo general en el agroecosistema tipo, mediante el establecimiento de ecuaciones, funciones gráficas o reglas de decisión. El sexto paso, es la validación del modelo aplicado al agroecosistema tipo. Finalmente, el séptimo paso es el análisis de resultados para establecer los niveles de importancia o valor asociados a los SE.

A continuación, se especifican los pasos para el desarrollo de la metodología de valoración de SE mediante modelación en dinámica de sistemas.

3.1 Paso 1 - articulación del problema y conceptualización

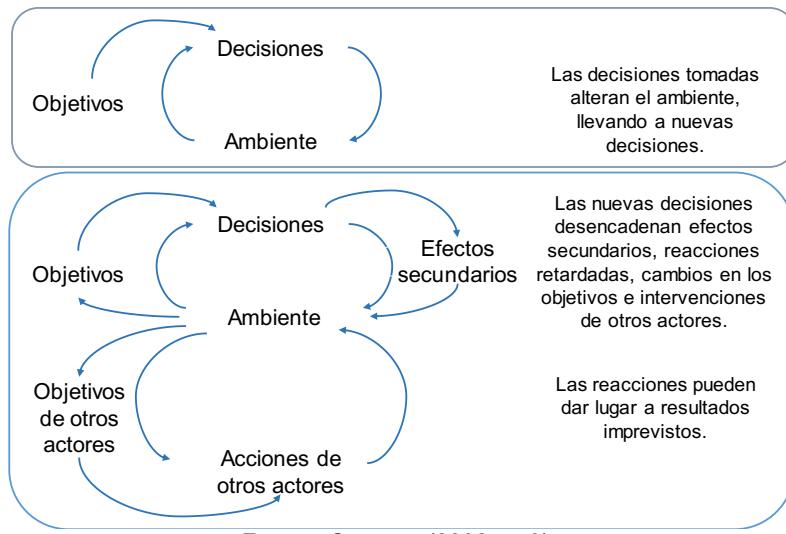
En este paso se identifica el propósito para el cual se diseña el modelo, el problema central de la investigación, los conceptos y las variables claves que se deben considerar.

3.2 Paso 2 - formulación de las hipótesis dinámicas parciales

En este paso se describen las hipótesis dinámicas que permiten explicar el problema que se está considerando. Las hipótesis dinámicas ayudan a desarrollar una apreciación de la complejidad del sistema, siendo una aproximación conceptual desde la teoría de sistemas y de los sistemas complejos (Izquierdo et al., 2008).

Las hipótesis dinámicas se formulan mediante ciclos causales que representan las relaciones que existen entre las variables claves del modelo y los elementos relevantes del sistema. Las relaciones también pueden ser entendidas entre los objetivos que se buscan, las decisiones que se toman y el ambiente que se altera llevando a nuevas decisiones, como puede observarse en la figura 3-1. En sistemas complejos, las decisiones pueden tener efectos secundarios, retardos, cambios y alteraciones no esperadas sobre el ambiente, al igual que las acciones y los objetivos de otros actores en la toma de decisiones (Sterman, 2002).

Figura 3-1. Visión general de ciclos causales de retroalimentación



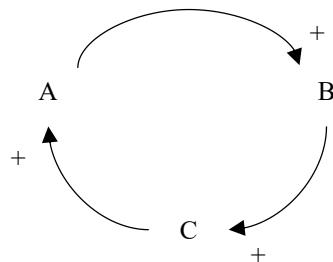
Fuente: Sterman (2002, p. 9)

En el caso particular de la valoración de SE en agroecosistemas sostenibles desde el marco de valoración, se proponen cinco dimensiones, cada una de ellas asociadas a una serie de principios o premisas, cuyo nivel de cumplimiento demuestra el valor que los SE tienen para el funcionamiento del agroecosistema. La medición del nivel en que los SE contribuyen a la productividad, la estabilidad, la confiabilidad, la resiliencia, la equidad y la autogestión, se realiza por medio de criterios de valoración. Las dimensiones, principios y criterios se establecen en la tabla 2-2.

En el Paso 2 de la modelación, se identifican los indicadores de valoración para cada criterio, siendo expresiones cualitativas o cuantitativas que relacionen una o más variables y permiten medir la aplicación de los criterios de valoración en un agroecosistema sostenible. Los indicadores identificados se integran mediante los diagramas de ciclos causales parciales para cada dimensión de valoración.

En los diagramas de ciclos causales las relaciones entre las variables están representadas por lazos, sobre los cuales se establece la polaridad de la relación. Esta polaridad se representa por medio de un signo positivo o negativo (+ o -) que indica el tipo de influencia ejercida por una variable sobre la otra.

Figura 3-2. Ejemplo de relaciones entre variables

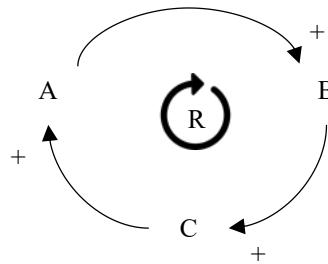


Fuente: (Sussman, 2012)

Un signo positivo "+" quiere decir que un cambio en la variable origen del lazo producirá un cambio del mismo sentido en la variable destino. Es decir, si la variable origen aumenta la variable destino también. El signo negativo "-" simboliza que el efecto producido será en sentido contrario, si la variable origen aumenta la variable destino disminuye. En la figura 3-3 se muestra un ejemplo de interacción entre variables, en este caso sus relaciones son de signo positivo.

Luego de identificados los ciclos causales y la polaridad entre las relaciones, se establece si los ciclos causales son reforzados o balanceados. Si el ciclo sólo presenta signos positivos, o si el número de signos negativos es par, se considera un ciclo causal reforzado "R". Los ciclos se definen como balanceados cuando el número de relaciones con polaridad negativa es impar ($-a \times b = -c$). Los ciclos balanceados conllevan a la estabilidad del sistema. En la figura 3-3 se presenta un ciclo causal reforzado, dado que todas las relaciones entre las variables son de signo positivo.

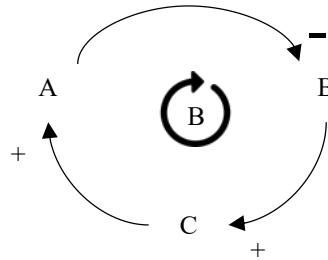
Figura 3-3. Ejemplo de ciclo causal reforzado



Fuente: (Sussman, 2012)

En la figura 3-4 existen tanto relaciones negativas (-) como relaciones positivas (+). El número de relaciones "negativas" es impar, por tanto, el ciclo causal es "negativo" y balanceado.

Figura 3-4. Ejemplo de ciclo causal balanceado



Fuente: (Sussman, 2012)

Los diagramas de ciclos causales parciales son establecidos para cada una de las cinco dimensiones de valoración: ecológica, económica, sociocultural, tecnológica y política. Las variables en estos ciclos se derivan de los indicadores que cuantifican los criterios de valoración propuestos. Los diagramas de ciclos causales definen la estructura del modelo matemático, las variables que hacen parte de los ciclos se convierten en reservorios (stocks) de información y en flujos de información.

Luego de establecidos los ciclos causales parciales en cada dimensión, se realiza una validación no formal mediante la estrategia de consulta a expertos. La consulta se aplica para evaluar la coherencia de los ciclos causales identificados, frente a los fenómenos de interacción y dependencia que pretenden representar (Godoy y Bartó 2002).

3.3 Paso 3 - definición del modelo general de valoración: ciclo causal integrado

El modelo general de valoración se constituye por las relaciones que pueden existir entre los ciclos causales parciales, el diagrama resultante es una aproximación a la complejidad que subyace a la valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas. El ciclo causal integrado permite observar las relaciones entre las dimensiones de valoración, dando la posibilidad de identificar nuevos ciclos o nuevas relaciones. Igualmente, el ciclo causal integrado permite identificar las variables relevantes como puntos de conexión entre los ciclos causales parciales.

3.4 Paso 4 – establecimiento del agroecosistema tipo para valoración de SE

La aplicación del modelo general se realizará en un agroecosistema tipo (AT) el cual recoge los tres rasgos fundamentales de un agroecosistema sostenible: el primero, el ser diseñado y manejado desde una visión sistémica compleja, el segundo, la implementación de los macroaspectos de sostenibilidad, y el tercero, el aporte al bienestar de las comunidades. Estos rasgos del AT proveen SE, los cuales pueden ser identificados y valorados.

El AT es seleccionado mediante la metodología establecida a continuación:

1. Identificación de agroecosistemas estudiados por la comunidad científica, mediante tesis de maestría o doctorado, artículos científicos, informes de instituciones. Se dará prioridad a los documentos que puedan ser consultados en bases de datos de universidades, centros de investigación y bases de datos en línea como Scielo, Proquest, Science Direct, entre otras.
 - Los agroecosistemas por considerar para la selección del AT deben contar con trabajos científicos que incluyan su análisis bajo una o varias dimensiones del valor (ecológica, sociocultural, económica, tecnológica, política). De preferencia incluir el desarrollo de temáticas relacionadas con los principios, criterios o indicadores de valoración (tabla 2-2 y anexo D).
 - Los agroecosistemas por considerar en la selección del AT deben contar con datos relacionados con los indicadores de valoración de SE (anexo C).
2. Una vez identificados los agroecosistemas para la selección AT, se aplicará una matriz para calificar su relación con las características requeridas, designando un puntaje de la siguiente manera: alto (3), medio (2), bajo (1) y nulo (0). A continuación, se describen las características de selección:
 - a. Característica 1: la primera característica requerida de selección, se relaciona con los rasgos fundamentales de un agroecosistema sostenible los cuales permiten generar y conservar las funciones y SE. Los rasgos son:

- Diseño y manejo desde una visión sistémica compleja. Esta visión permite estudiar al agroecosistema en su complejidad e integralidad, asumiendo la incertidumbre sobre los comportamientos emergentes y las sinergias que pueden resultar de la interacción de sus diferentes componentes, permite incluir aspectos ecológicos, socioculturales, económicos, tecnológicos y políticos y sus interrelaciones en la valoración de SE (numeral 1.1.1.2).
 - Implementación de macroaspectos de sostenibilidad, los cuales son biodiversidad, cultura y tecnología, estrategias agroecológicas y reducción de efectos ambientales (figura 1-5).
 - Aporte al bienestar de las comunidades, al generar y mantener atributos como productividad, estabilidad, viabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autosuficiencia.
- b. Característica 2: existencia y acceso a la información que permita el cálculo de los indicadores que hacen parte de las hipótesis dinámicas establecidas en el modelo general.
 - c. Característica 3: los agroecosistemas por considerar en la selección del AT deben contar con la posibilidad de obtener certificaciones de protección de la biodiversidad.

Una vez seleccionado el agroecosistema tipo se delimitarán aspectos específicos como:

- a. Región biogeográfica
- b. Delimitación biofísica (algunas de las variables consideradas son: temperatura, precipitación, altura sobre el nivel del mar)
- c. Delimitación del cultivo (s), especies cultivadas, distanciamientos, métodos de cultivo y cosecha.
- d. Delimitación sociocultural y económica, en cuanto a mercados, comunidades, población, etc.

3.5 Paso 5 - formalización del modelo

Una vez establecido el modelo general, formado por la integración de los ciclos causales parciales para cada dimensión, se realizará la formalización del modelo mediante la utilización del software Stella® (versión 1.6). Mediante el software se lleva el modelo general (no formal) conformado por los ciclos causales o hipótesis dinámicas a un modelo de stock y flujo (modelo formal). El modelo formal es alimentado por datos (series de tiempo) derivados de los indicadores de valoración de SE y calculados para el agroecosistema tipo.

- Descripción de los límites del modelo

El propósito de la definición de los límites del modelo, es identificar las variables endógenas (internas) y exógenas (externas) que permitan explicar adecuadamente el problema. Un indicador se considera endógeno cuando presenta dos características, la primera si es influenciado directamente por otros indicadores y la segunda si es calculado por el modelo según las condiciones iniciales o internas del sistema. Un indicador se clasifica como exógeno si siempre actúa como causa sobre los otros indicadores o se calcula con datos independientes del sistema (Sterman, 2002). Las variables endógenas harán parte de las ecuaciones que son calculadas utilizando el modelo matemático diseñado, mientras que las variables exógenas son alimentadas por información externa al modelo.

Las variables que finalmente harán parte del modelo se derivan de los indicadores de valoración (paso 2). Se verifica la pertinencia del uso de la variable en la valoración de SE en el agroecosistema tipo y se calcula en función de la información identificada mediante revisión documental.

La definición de una variable como endógena se determina por el nivel de relaciones que tenga con las demás variables, la variable endógena es central y nodal dentro de los ciclos causales y especialmente en el modelo general establecido en el Paso 3. Por otra parte, una variable exógena se caracteriza por mínimas relaciones con otras variables y se encuentra generalmente en la periferia del ciclo causal integrado.

- Descripción de la estructura del modelo y definición de las ecuaciones

La definición de las ecuaciones para el modelo se inicia con la revisión documental de la existencia de relaciones preestablecidas. Es decir, si existen teorías, relaciones o ecuaciones validadas y reconocidas que ya incorporen las variables de interés. Si las relaciones entre los indicadores no están preestablecidas, se crean ecuaciones, basadas en series de tiempo usando estrategias de regresiones estadísticas lineales o no lineales (Draper & Smith, 2014). La validación y selección de las ecuaciones se realiza aplicando criterios estadísticos como, valor-p, análisis de varianza y predicción de errores.

- Se selecciona la ecuación con el R^2 , R^2 ajustado más altos, y el valor- p más bajo
- Cada variable debe ser significativa (α) en la ecuación
- Se aplican el "test F" estadístico del análisis de varianza y sus resultados se comparan con el valor de Fisher establecido ($F \text{ table } [\alpha; \sqrt{1}, \sqrt{2}]$)

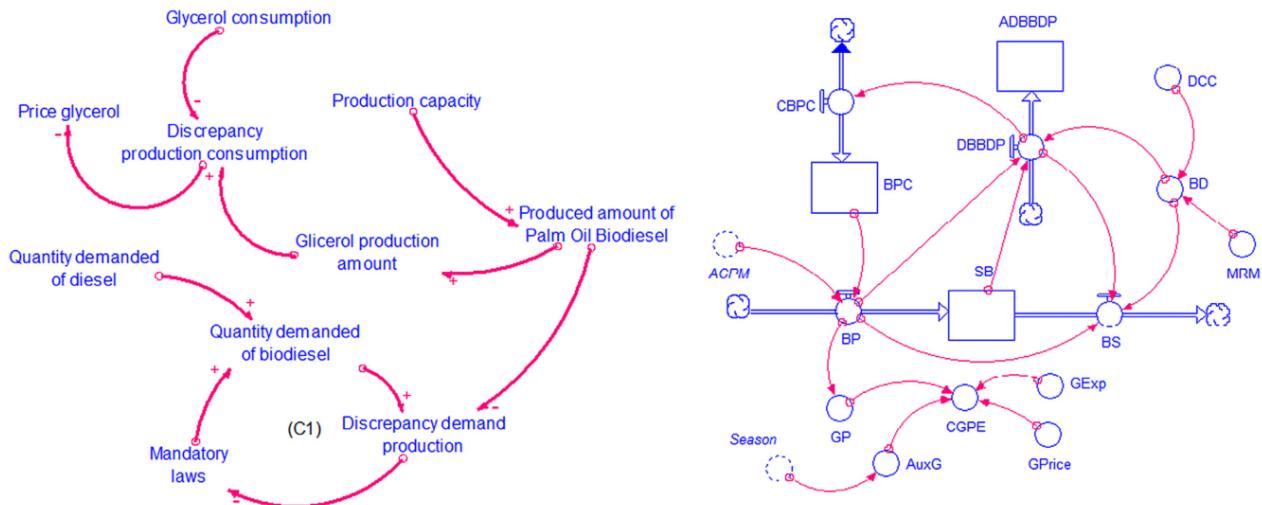
$$\begin{aligned} \text{Si } "F - \text{test de análisis de varianza}" > "F \text{ table } (\alpha; \sqrt{1}, \sqrt{2})" \\ \alpha = 0,10 \end{aligned}$$

- Formalización del modelo

Se realiza la formalización del modelo con el fin de traducir los ciclos causales al lenguaje de modelización en el software Stella®. Este lenguaje de programación está diseñado para facilitar el modelado de sistemas no lineales y dinámicos, con el fin de mejorar la comprensión del sistema al poder realizar análisis de escenarios y sensibilidad (Costanza et al., 1998). Según Shi y Gill (2005) Stella® proporciona una herramienta para realizar un seguimiento de las complejas interrelaciones y bucles de retroalimentación entre variables, mediante la construcción de los diagramas de almacenamiento (stock) y flujo (figura 3-5).

Al realizar la modelación del agroecosistema tipo, se obtienen gráficas que muestran el comportamiento, interrelaciones y sinergias del agroecosistema con los servicios ecosistémicos, los resultados obtenidos permiten realizar los análisis de valoración. La modelación identifica posibles trade-offs entre SE, los cuales pueden surgir cuando el aumento de un SE provoca el descenso de un SE diferente (Bennet, Peterson & Gordon, 2009).

Figura 3-5. Ejemplo de diagrama de almacenamiento (stock) y flujo



Fuente: Espinoza et al. (2017)

Para identificar las variables clasificadas como flujos, stocks o variables externas en el sistema, es necesario determinar cuáles de ellas definen su estado (stock) y cuáles definen los cambios en su estado (flows). Las variables no incluidas en estas clasificaciones se consideran auxiliares (Michael & Robert, 1997). La siguiente directriz puede ser útil para ayudar a identificar los stocks y flujos:

- Los stocks suelen representar sustantivos y los flujos suelen representar verbos.
- Los stocks no desaparecen si se detiene el tiempo. Contrariamente, los flujos desaparecen en la misma situación.
- Los stocks envían señales (información sobre el estado del sistema) al resto del sistema.

El modelador determina cuán razonable es el diagrama conceptualizado, una vez el modelo se concluye y se realiza la simulación con las ecuaciones seleccionadas (Albin, 1997). Como consecuencia, únicamente finalizado el modelo, es posible observar si representa la realidad del sistema o si se deben hacer ajustes para mejorar su comportamiento.

3.6 Paso 6 - método de validación del modelo

La validación de los modelos en dinámica de sistemas plantea importantes desafíos, ya que se tiende a reducir el modelo a las respuestas que provienen del lenguaje computacional. A este respecto Forrester (1985) afirma que el valor de un modelo se encuentra en su capacidad de generar conocimiento durante el proceso mismo de su construcción, no solamente en su capacidad de predecir. La calidad del modelo está relacionada por el nivel de avance en la comprensión del sistema estudiado (Godoy & Bartó, 2002).

Las estrategias que permiten validar la calidad y coherencia del modelo son:

- La validación informal a través de consulta a expertos, mediante entrevistas, paneles y la prueba de Turing (Godoy & Bartó, 2002).

- La validación a través de criterios (Barlas, 1994; Sargent, 2009) como:
 - La correspondencia entre la estructura del modelo: la definición de la estructura apropiada, responsable del comportamiento “adecuado” es un proceso que incluye la representación del problema, estructuras lógicas y relaciones matemáticas y causales (Forrester & Senge, 1996). Qudrat-Ullah y Seong (2010) establecen como pruebas para la validación estructural de un modelo, la adecuada definición de los límites del sistema, la verificación de la estructura, la cual debe representar apropiadamente el conocimiento sobre el sistema estudiado (hipótesis dinámicas propuestas mediante los ciclos causales) y la consistencia dimensional.
 - La correspondencia entre el comportamiento modelado del sistema y el comportamiento real del sistema (ecuaciones y gráficas vs realidad): considerando que las condiciones iniciales del modelo son ajustadas a un tiempo en el pasado del agroecosistema estudiado, entonces el comportamiento del modelo debe replicar los datos históricos entre ese tiempo y el presente. Es recomendable que los datos recopilados en campo sean utilizados para validar el modelo y otros para ajustarlo, aumentando así la confianza en el modelo. La capacidad de representar los datos reales generados por una ecuación, es evaluada al utilizar el criterio de los indicadores de error (Mean absolute percentage error - MAPE).
 - Criterio de correspondencia entre fenómenos: se determina si el modelo puede representar fenómenos que se observan en forma permanente en el sistema estudiado o genera comportamientos emergentes no esperados.

Si el modelo cumple con estos criterios, se puede afirmar que es válido y representa la realidad del sistema modelado.

3.7 Paso 7 - análisis de resultados

Los resultados generados por la modelación en dinámica de sistemas utilizando el software Stella® (versión 1.6) son expresados a través de figuras y tablas. En las figuras, se observan los comportamientos en el tiempo de los indicadores relacionados con las dimensiones del valor propuestas. Es posible graficar varios indicadores en la misma figura, con el propósito de comparar sus dinámicas y establecer si las influencias planteadas en las hipótesis causales son observables en el comportamiento de los indicadores. Así mismo, se discuten las relaciones entre los resultados de los indicadores calculados y los SE valorados, estableciendo para el agroecosistema tipo estudiado, una diferenciación entre los SE debido a su asignación de valor.

4. Modelo general de valoración de SE basado en dinámica de sistemas

La determinación de un modelo general de valoración de SE en agroecosistemas sostenibles se realiza con el propósito de establecer las interacciones, influencias y ciclos causales entre los indicadores identificados en cada dimensión del valor. El modelo general integra los resultados de los dos primeros capítulos de esta investigación, ya que parte de la articulación de las bases teóricas y conceptuales desde la agroecología y la economía ecológica, incorporando el marco de valoración de SE en agroecosistemas (dimensiones, principios, criterios e indicadores). La construcción del modelo general se basa en los pasos de modelación en dinámica de sistemas y fundamentalmente en las hipótesis dinámicas (ciclos causales). El modelo general hace parte de los aportes metodológicos de esta investigación desde la EE.

El proceso de construcción del modelo general es consecuente con los enfoques de valoración propuestos. Con el enfoque multidimensional, al integrar los indicadores asociados a las cinco dimensiones del valor. Con el enfoque sistémico, al observar las interacciones, influencias y causalidades entre indicadores. Con el enfoque ecológico, al mantener la premisa de la teoría de sostenibilidad fuerte en la definición de los indicadores y las relaciones entre éstos. Con el enfoque transdisciplinar, al considerar indicadores propuestos desde diferentes disciplinas que estudian los SE en agroecosistemas. Con el enfoque participativo, mediante la revisión de literatura y la incorporación de los aportes realizados a través de la consulta a expertos (anexo B) que contribuyen a la definición del marco de valoración. Los aportes de los autores consultados en la revisión de literatura y en la consulta a expertos, permiten involucrar en la investigación las percepciones y aportes de diferentes comunidades. Aportes que han sido recogidos por los autores y expertos en los resultados de sus investigaciones y que son retomados en la definición de dimensiones, principios, criterios e indicadores.

En este cuarto capítulo se implementan los tres primeros pasos de la modelación en dinámica de sistemas iniciando con la articulación del problema y su conceptualización. Posteriormente, se establecen las hipótesis dinámicas parciales para cada dimensión y finalmente, se propone el modelo general de valoración.

4.1 Paso 1 - articulación del problema y conceptualización

La articulación del problema y su conceptualización se llevan a cabo mediante la integración de las bases teóricas y conceptuales desde la agroecología y la economía ecológica (capítulo 1). Posteriormente se establece el marco de valoración de SE en agroecosistemas sostenibles (AS) (capítulo 2) orientado por los enfoques de valoración (transdisciplinar, sistémico, ecológico, multidimensional y participativo). El marco de valoración se implementa a través de los indicadores compilados en los anexos C y D.

4.2 Paso 2 - hipótesis dinámicas parciales

El marco de valoración de SE en agroecosistemas se constituye por las cinco dimensiones del valor: ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política. Cada dimensión consta de principios, criterios e indicadores de valoración. Los indicadores permiten cuantificar los criterios y son empleados para la construcción de las hipótesis dinámicas parciales que finalmente, constituyen los ciclos causales en cada dimensión.

Los indicadores de valoración son fundamentales en la construcción de las hipótesis dinámicas, ya que se encuentran asociados al logro del criterio de valoración. Los indicadores reflejan la medición de las funciones ecosistémicas y de los SE derivados. La identificación de las relaciones, influencias e interdependencias entre los indicadores permiten plantear las hipótesis dinámicas parciales. El objetivo de las hipótesis es identificar el comportamiento dinámico entre los indicadores propuestos y los SE valorados, además de proporcionar información sobre el nivel de importancia o valor que el SE puede tener para la sostenibilidad del agroecosistema.

Se emplean tres estrategias para la identificación de indicadores y sus interrelaciones: la revisión de literatura, la verificación de posibilidad de acceso a datos históricos para los indicadores identificados y las recomendaciones dadas por los expertos durante el proceso de validación de principios y criterios (anexo B).

Con el objetivo de facilitar el reconocimiento de las relaciones de cada indicador con las funciones y SE valorados se retoman los 49 códigos establecidos en el anexo A (tabla A-3). Los códigos incorporan la clasificación de los SE y las funciones de regulación, hábitat, producción e información. Para cada indicador se establece: la fórmula de cálculo, las variables involucradas y la forma de interpretar el resultado obtenido (anexos C y D). Los indicadores identificados para cada dimensión, las funciones y SE valorados por indicador, se especifican previamente en los diagramas de ciclos causales parciales.

En la construcción de los ciclos causales se identifican las relaciones entre indicadores que constituyen los ciclos causales y la polaridad entre sus relaciones. La polaridad positiva (+) indica que un cambio en la variable origen producirá un cambio del mismo sentido en la variable destino. El signo negativo (-) simboliza que el efecto producido se desarrolla en sentido contrario. Posteriormente, se establece si los ciclos causales son reforzados o balanceados. Si en el ciclo sólo se identifican relaciones positivas, o si el número de relaciones negativas es par, se considera un ciclo causal reforzado "R". Por otra parte, los ciclos se definen como balanceados cuando el número de relaciones con polaridad negativa es impar, siendo así ciclos balanceados que aportan a la estabilidad del sistema.

4.2.1 Ciclos causales de la dimensión ecológica

En la dimensión ecológica se identifican ocho ciclos reforzados (de R1 hasta R8) y un ciclo balanceado (B1). Los ciclos causales de la dimensión ecológica se presentan en la figura 4-1. Los indicadores y SE valorados para cada uno de los principios y criterios de la dimensión ecológica se relacionan en la tabla 4-1 y en el anexo C.

Tabla 4-1. Indicadores de la dimensión ecológica de valoración de SE

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).

Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).					
Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados	
Principio 1 - CEcol-1					
Índice de diversidad de Simpson (D)	Adim.	(Galán & Pérez, 2012)	H	Hábitat Mantenimiento de la diversidad biológica	Hab-28 y 29 Hmdb-30 y 31
Proporción de ganancia de especies	# especies / ha	(Portela & Rademacher, 2001)	H	Hábitat Mantenimiento de la diversidad biológica	Hab-28 y 29 Hmdb-30 y 31
Índice de Margalef	# especies	(Galán & Pérez, 2012)	H	Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb-30 y 31
Superficie con biodiversidad	ha	(IAD, 2017)	H	Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb-30 y 31

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
Riqueza y abundancia de especies (H'-Índice de Shannon)	Adim.	(Galán & Pérez, 2012)	H	Mantenimiento de la diversidad biológica Hábitat
Riqueza de especies vegetales y animales (R)	# especies /ha	(Méndez & Bacon, 2005)	H	Hábitat
Abundancia de especies vegetales y animales (Ae)	# individuos de cada especie/ ha	(Méndez & Bacon, 2005)	H	Mantenimiento de la diversidad biológica Hábitat
Estratos arbóreos	#estratos /ha	(Moraga et al., 2012)	H	Mantenimiento de la diversidad biológica
Proporción de especies nativas vegetales y animales (PEN)	% especies nativas/ ha	(Moraga et al., 2012)	H	Mantenimiento de la diversidad biológica
Índice de rotación de cultivos (Ir)	%	(Evia & Sarandon, 2002)	H	Hábitat Mantenimiento de la diversidad biológica
Manejo de la biodiversidad (rotación y diversificación (MBRD))	#	(Sarandón, Zuluaga, Cieza, Janjetic & Negrete, 2008)	H	Hábitat Mantenimiento de la diversidad biológica
Índice ecológico (IE)	#	(Sarandón, Zuluaga, Cieza, Janjetic & Negrete, 2008)	H	Mantenimiento de la diversidad biológica
			R	Retención de suelo
Biodiversidad funcional (BF)	#	(Iermanó, Sarandón, Tamagno & Maggio, 2015)	R	Prevención de alteraciones (resiliencia) Polinización Control biológico Mitigación del cambio climático Regulación del microclima
			H	Hábitat
			P	Alimentos Materias primas
Principio 1 - CEcol-2				
Estructura agroecológica principal EAP	#	(León, Mendoza & Córdoba, 2014; Cleves-Leguizamo, Toro-Calderón, Martínez-Bernal & León-Sicard, 2017)	H P R	Hábitat Alimentos Materias primas Regulación de gases (mitigación del cambio climático) Prevención de alteraciones Polinización Control biológico Regulación del microclima
Especies de aves migratorias (EAM)	#	(Musacchio & Grant, 2002)	H	Hábitat Mantenimiento de la diversidad biológica
Conectividad (C)	m	(Garay & Fernández, 2014)	H	Hábitat Mantenimiento de la diversidad biológica
Principio 2 - CEcol-3				
Diversidad de insectos benéficos (DIB)	# especies	(Rodríguez, Ropero & Armbrrecht, 2016; Vera, Gil & Benavides, 2008)	R	Control biológico
Diversidad de insectos polinizadores (DIP)	# especies	(Cepeda-Valencia, Gómez & Nicholls, 2014)	R	Polinización
Energía inyectada al agroecosistema proveniente del exterior (EIAE)	% de reducción de la energía inyectada al agroecosistema proveniente del exterior	(Funes-Monzote, 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	R P	Asimilación de residuos Formación de suelo y regulación de nutrientes Materias primas (conversión de la energía solar en biomasa)
Residuos biodegradables aprovechados	%	(Fu et al., 2000)	R	Asimilación de residuos Formación de suelo y regulación de nutrientes
Principio 2 - CEcol-4				

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
Semillas y especies de uso tradicional adaptadas a condiciones locales (SUT)	#	(Córdoba-Vargas, 2017)	H P I	Mantenimiento de la diversidad biológica Hmdb-30 al 31 Recursos genéticos Pps-40 Recursos medicinales Prm-41 Recursos ornamentales Pro-42 Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
Índice de resiliencia socioecológica (IRSE)	#	(Salazar, 2013)	R	Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 y 7
				Principio 3 – CEcol-5
Uso de insumos externos (combustibles fósiles y agroquímicos) (IE)	%	(Altieri et al., 2012; Funes-Monzote, 2011; Casimiro-Rodríguez, 2016)	R	Asimilación de residuos Rar-21 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-16 y 19
Aprovechamiento del potencial de fuentes renovables de energía (APFRE)	%	(Casimiro-Rodríguez, 2016)	R P	Asimilación de residuos Rar-21 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-16 y 19 Materias primas Pmp-37
				Principio 3 – CEcol-6
Dinámica media de sombra (DS)	Área media de sombra m ² /árbol	(Andrade & Segura, 2016)	R H	Regulación del clima Rc-4 y 5 Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 y 7 Regulación hídrica Rh-9 Rh-10 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 y 19 Polinización de los cultivos Rp-23 Hábitat Hab-28 y 29 Mantenimiento de la biodiversidad biológica Hmdb-31
Velocidad del viento (V)	Kph	(Alanoca, 2012).	R	Regulación del clima Rc-4 y 5
				Principio 3 – CEcol-7
Índice de escasez de agua (le)	%	(Reinoso, Durango & Sandoval, 2011)	R	Regulación hídrica Rh-9 al 11 Abastecimiento de agua Raa-13
Disponibilidad de agua para el cultivo en el suelo (IHS)	Número	(Farfan & Mestre, 2004)	R	Regulación hídrica Rh-8-11 Abastecimiento de agua Raa-13
Índice de satisfacción de necesidades hídricas (ISNH)	Número	(FAO, IIASA, 2000)	R	Regulación hídrica Rh-9 Rh-10 Abastecimiento de agua Raa-13 Regulación hídrica Rh-9 y 10 Regulación del clima Rc-4
Uso de agua en el cultivo (UAC)	m ³ /ha año	(Cardona & Ochoa, 2013)	R	Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22 Regulación del clima Rc-4 Regulación hídrica Rh-9 y 10
Requerimiento de agua de un cultivo (RAC)	m ³ ha/año	(Cardona & Ochoa, 2013)	R	Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22 Regulación del clima Rc-4 Regulación hídrica Rh-9 y 10
Evapotranspiración diaria del cultivo (ETc)	mm/día	(Allen, 2006; Cardona & Ochoa, 2013)	R	Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22
Consumo de agua para actividades de transformación de los productos (CATP)	Litros/Kg de producto trasformado	(Cardona & Ochoa, 2013)	R	Abastecimiento de agua Raa-13
Consumo de agua para el uso doméstico (CAUD)	m ³ /mes	(Cardona & Ochoa, 2013; Cerdán et al., 2012; Bacon et al., 2013)	R	Abastecimiento de agua Raa-13

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
		al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014)		
Agua virtual contenida en un cultivo (AVCc)	m ³ /ton producto		R	Regulación del clima Rc-4 Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22 Regulación del clima Rc-4 Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22
Agua contaminada generada (HHA)	m ³ /ha	(Cardona & Ochoa, 2013)	R	Regulación del clima Rc-4 Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22
Tratamiento de aguas residuales (domésticas, derivadas del cultivo y procesos) (ART)	%	Autor (2018) basado en (Cerdán et al., 2012; Bacon et al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014)	R	Asimilación de residuos Rar-21 y 22 Regulación del clima Rc-4 Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22
Agua verde (HHA _{verde})	m ³ /ton	(Cardona & Ochoa, 2013)	R	Regulación del clima Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Regulación del clima Rc-4 Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22
Agua azul (HHA _{azul})	m ³ /ton	(Cardona & Ochoa, 2013)	R	Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Regulación del clima Rc-4 Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22
Agua gris (HHA _{gris})	m ³ /ton	(Cardona & Ochoa, 2013)	R	Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Asimilación de residuos Rar-22
Índice de calidad fisicoquímica del agua (ICA)	Número	(Cardona & Ochoa, 2013)	R	Regulación Rar-22 Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 y 7 Regulación hídrica Rh-9 y 10 Abastecimiento de agua Raa-13 Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 y 19 Polinización de los cultivos Rp-23 Hábitat Hab-28 y 29
Prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA)	Número	Autor (2018) basado en (Cardona & Ochoa, 2013)	H	Mantenimiento de la biodiversidad biológica Hmdb-31 Regulación hídrica Rh-9 y 12
Precipitación (\bar{P})	mm/m ²			Regulación hídrica Rh-9 y 12
Disponibilidad de agua subterránea (D _{as})	m ³	(Ferreira et al., 2016)	R	Regulación hídrica Rh-9, 10 y 12 Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 y 7
Eficiencia en los sistemas de irrigación	%	(Hoyos, 2002)	I	Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49 Regulación hídrica Rh-8
Factor de variabilidad climática (FVC)	Factor adimensional	(Ferreira et al., 2016)	R	Abastecimiento de agua Raa-13 Regulación del clima Rc-5
Principio 3 – CEcol-8				
Residuos no biodegradables y peligrosos generados (RNBG)	%	(Autor, 2018)	R	Asimilación de residuos Rar-22
Estructura del suelo (Es)	#			Regulación de gases Rg-2
Compactación e infiltración del suelo (Cl _s)	#	(Altieri & Nicholls, 2002)	R	Regulación hídrica Rh-10 y 11 Retención del suelo Rrs-14 y 15 Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 y 19 Asimilación de residuos Rar-22
Profundidad del suelo (Ps)	#			
Materia orgánica en el suelo (MOs)	ton/ha año	(Altieri & Nicholls, 2002; Cardona & Sadeghian, 2013).	R	Regulación de gases Rg-1 Rg-2

122 Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
				Regulación hídrica Rh-10 y 11
				Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-17 al 20
				Polinización de los cultivos Rp-23
			H	Hábitat Hab-28 y 29
				Mantenimiento de la biodiversidad biológica Hmdb-31
Densidad aparente (DA)	g / cm3	(Salamanca & Sadeghian, 2005)	R	Regulación hídrica Rh-10 Rh-11
Retención de humedad en el suelo (RHs)	mm/año	(Velásquez & Jaramillo, 2009)	R	Regulación hídrica Rh-10 Rh-11
Desarrollo de raíces (DRs)	#			Regulación de gases Rg-2
Cobertura del suelo (Cs)	%	(Altieri & Nicholls, 2002; IAD, 2017; Moraga et al., 2012)	R	Retención del suelo Rrs-14 y 15
Erosión (E)	%			Regulación hídrica Rh-10 y 11
				Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 y 19
				Asimilación de residuos Rar-21
				Regulación hídrica Rh-10 y 11
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-17 y 20
Actividad biológica en el suelo (Abs)	# lombrices / m ²	(Vásquez-Vela, 2014; Montagnini et al., 2015)	R	Asimilación de residuos Rar-21
				Polinización de los cultivos Rp-23
			H	Hábitat Hab-28 y 29
				Mantenimiento de la biodiversidad biológica Hmdb-31
Riesgo de erosión (Re)	#	(Sarandón et al., 2008)	R	Retención del suelo Rrs-14 y 15
Pérdida suelo por erosión (Pse)	#	(Portela & Rademacher, 2001; Pérez-Nieto, Valdés-Velarde & Ordaz-Chaparro, 2012)	R	Regulación de gases Rg-2
Factor de cobertura y manejo del suelo (Fcms)	#			Regulación hídrica Rh-10 y 11
				Retención del suelo Rrs-14 y 15
Aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S)	#	(Portela & Rademacher, 2001)	R	Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 y 19
				Asimilación de residuos Rar-22
				Retención de suelo Rrs-14 y 15
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-19
			P	Asimilación de residuos Rar-21 y 22
				Conversión de energía solar en biomasa Pmp-39
Nitrógeno en el suelo (NS)	kg N / ha año	(Merino, 1986; Durán-Umaña & Henríquez-Henríquez, 2006)	R	Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-19
				Regulación hídrica Rh-10 y 11
Prácticas de conservación de la vida en el suelo (PCVS)	#	(Sarandón et al., 2008)	R	Retención del suelo Rrs-14 y 15
				Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Rfs-19
				Asimilación de residuos Rar-22
Principio 3 – CEcol-9				
Captura de CO ₂ (CDC)	Kg de CO _{2-eq} / ha	(Moraga et al., 2012)	R	Regulación de gases (mitigación del cambio climático) Rg-2 y 3
Captura de carbono en fuste (CA)	Kg de CO _{2-eq} /ha	(López, 2012)	R	Regulación de gases (mitigación del cambio climático) Rg-1 al 3
Emissions de GEI por energía generada (EGEIEn)	Kg de CO _{2-eq} /ha	(IAD, 2017)	R	Regulación de gases (mitigación del cambio climático) Rg-1 al 3
Balance positivo de carbono y GEI (Captura-emisión)	Kg de CO _{2-eq} /ha	(Montagnini, Somarriba-Chávez, Fassola & Eibl, 2015) (López, 2012)	R	Regulación de gases (mitigación del cambio climático) Rg-1 al 3
Emisión de gases de efecto invernadero (EGEI)	Kg de CO _{2-eq} / Kg de café verde producido/ ha	Autor (2018) basado en (Segura & Andrade, 2012; Poroma-Colmena, 2012)	R	Regulación de gases (mitigación del cambio climático) Rg-1 al 3

Fuente: autor (2018)

El ciclo R1, identifica la influencia de las prácticas de conservación de la vida en el suelo como el manejo de la cobertura vegetal, la diversificación y la rotación de cultivos, en el porcentaje de cobertura del suelo. A mayores prácticas de manejo de cobertura, se reduce el riesgo de erosión y las pérdidas de suelo, mejorando el índice ecológico del agroecosistema (Portela & Rademacher, 2001; Belcher et al., 2004; Sarandón, Zuluaga, Cieza, Janjetic & Negrete, 2008; Moraga et al., 2012).

En el ciclo R1 los SE valorados por los indicadores involucrados, se relacionan con las funciones de hábitat (Hab-29), al generar condiciones para refugio, alimentación y sitio de reproducción de la biota en el suelo. Al igual que las funciones de mantenimiento de la biodiversidad biológica (Hmdb-31), relacionadas con la variedad de especies que interactúan dentro y fuera del agroecosistema, generando tanto las condiciones de hábitat como la variedad de especies y biota en el suelo necesaria para el almacenamiento y ciclaje de nutrientes (Portela & Rademacher, 2001; Belcher et al., 2004; Sarandón, et al., 2008; Moraga et al., 2012; Nicholls et al., 2015; Pérez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016; Sayago, 2016; Güldner & Krausmann, 2017; Nicholls et al., 2017).

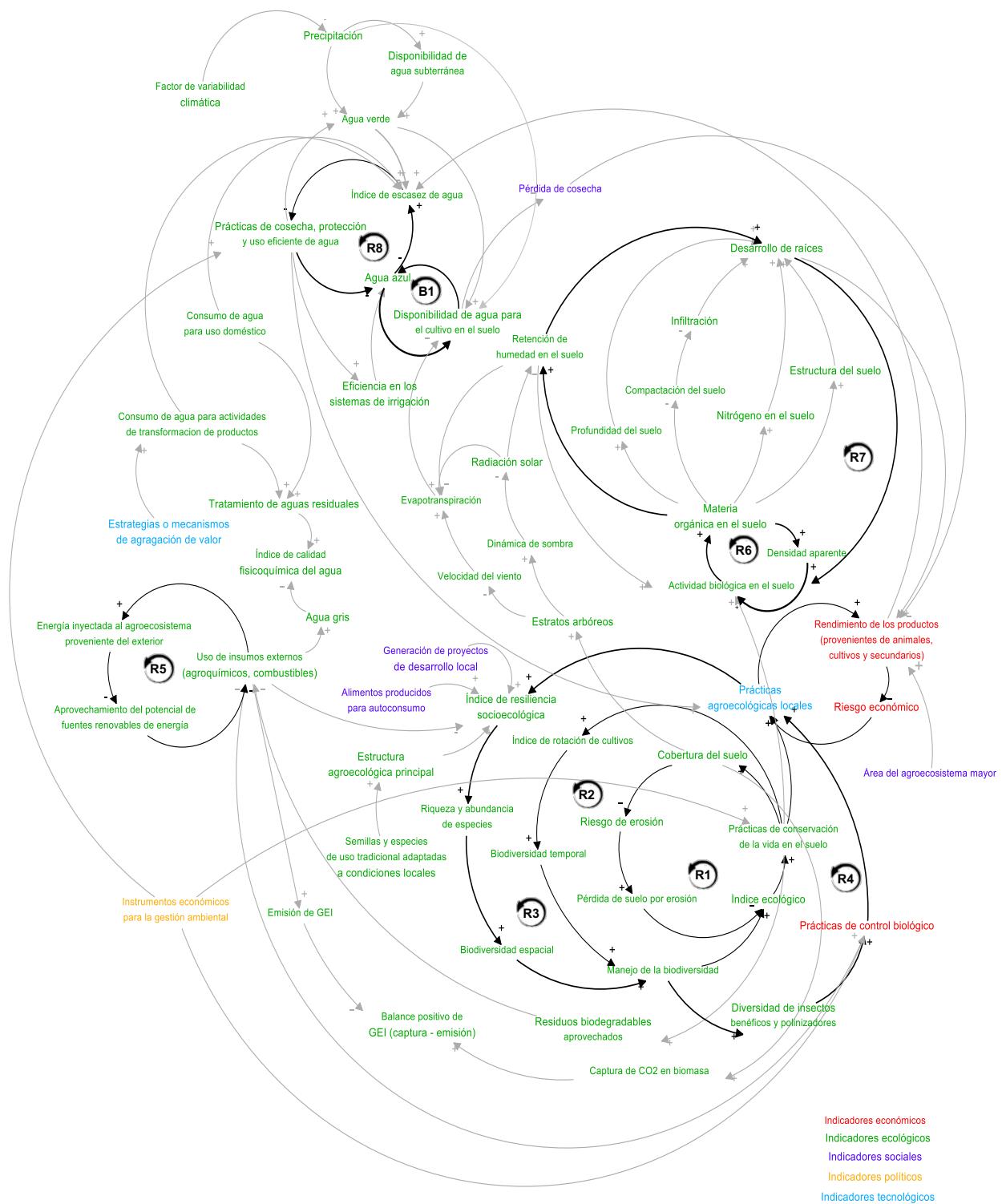
Los indicadores de riesgo de erosión y pérdida de suelo por erosión, resaltan la importancia de las funciones de regulación (Rrs-14), al mantener las tierras del agroecosistema cultivables y (Rrs-15) al prevenir los daños que pueden ser generados por la erosión y la sedimentación. Finalmente, el índice ecológico refuerza la importancia de la implementación de las prácticas de conservación de la vida en el suelo del agroecosistema (Portela & Rademacher, 2001; Belcher et al., 2004; Sarandón et al., 2008; Pérez-Nieto et al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Machado et al., 2015; Pérez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016).

Los ciclos R2 y R3 influencian el comportamiento del ciclo R1, en los indicadores índice ecológico y prácticas de conservación de la vida en el suelo. En el ciclo R2, las prácticas de conservación de la vida en el suelo influencian el índice de rotación de cultivos, mejorando tanto la biodiversidad temporal como el manejo de la biodiversidad en el agroecosistema (Portela & Rademacher, 2001; Evia & Sarandon, 2002; Belcher et al., 2004; Sarandón et al., 2008).

Los indicadores del ciclo R2, índice de rotación de cultivos, biodiversidad temporal y manejo de la biodiversidad valoran las funciones de hábitat (Hab-28, Hab-29) y las funciones de mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-30, Hmdb-31). Al generar condiciones de refugio, alimentación y sitio de reproducción, se mantienen las especies animales y vegetales deseables que interactúan dentro y fuera del agroecosistema, conservando el material genético deseado (Evia & Sarandon, 2002; Belcher et al., 2004; Sarandón et al., 2008, Pérez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016; Vargas & Osorio, 2016; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017).

En el ciclo R3, la implementación de prácticas de conservación de la vida en el suelo influencia el indicador denominado: prácticas agroecológicas locales (dimensión del valor tecnológico). Indicador conformado por las prácticas de conservación de la vida del suelo, las prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua y las prácticas de control biológico. Al incrementar las prácticas agroecológicas locales se influencia positivamente el índice de resiliencia socioecológica. Es decir, que el índice de resiliencia también se incrementa, influenciando el aumento de la riqueza y abundancia de especies, el manejo de la biodiversidad y el índice ecológico en el agroecosistema (Portela & Rademacher, 2001; Belcher et al., 2004; Sarandón et al., 2008; Galán & Pérez, 2012; Salazar, 2013).

Figura 4-1. Ciclos causales de la dimensión ecológica de valoración de SE



Fuente: autor (2018)

En el ciclo R3, mediante el indicador denominado índice de resiliencia socioecológica se valoran funciones de regulación (Rpa-6, Rpa-7) relacionadas con el aumento de la resiliencia del agroecosistema y la adaptación a condiciones cambiantes. La mejora de la resiliencia promueve el incremento de la riqueza y abundancia de especies que a su vez favorece la biodiversidad espacial. Mediante la medición del indicador manejo de la biodiversidad, se valoran especialmente las funciones de hábitat (Hab-28, Hab-29) y las funciones de mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-30, Hmdb-31) (Sarandón et al., 2008; Galán & Pérez, 2012; Salazar, 2013; Gutiérrez et al., 2016; Vargas & Osorio, 2016; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017).

El ciclo R4 está influenciado por indicadores de los ciclos R1, R2 y R3. Inicia con el indicador prácticas de control biológico, las cuales favorecen la implementación de las prácticas agroecológicas locales, mejorando la resiliencia socioecológica del agroecosistema. Dentro de las prácticas locales de control biológico, se encuentra el uso de especies locales que mejoran la riqueza y abundancia del agroecosistema, mejorando la biodiversidad espacial y su manejo, generando condiciones para contar con mayor diversidad de insectos benéficos y polinizadores que refuerzan el control biológico en el agroecosistema (Nicholls, 2008; Sarandón et al., 2008; Vera, Gil & Benavides, 2008; Galán & Pérez, 2012; Salazar, 2013; Cepeda-Valencia et al., 2014; Rodríguez, Ro & Armbrecht, 2016).

Los indicadores asociados al ciclo R4 son: prácticas agroecológicas locales (indicador del valor tecnológico), índice de resiliencia socioecológica, riqueza y abundancia de especies, biodiversidad espacial, manejo de la biodiversidad, diversidad de insectos benéficos y polinizadores y prácticas de control biológico (indicador de valor económico). Mediante el indicador diversidad de insectos benéficos y polinizadores, se valoran SE de regulación como el control biológico (Rcb-24, Rcb-25, Rcb-26 y Rcb-27), relacionados con la generación de hábitats para insectos benéficos que realizan control de insectos plaga. La utilización de especies vegetales para producción de sustancias alelo-químicas incrementan el control biológico y reducen los daños a los cultivos (Altieri et al., 2012; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; De Souza et al., 2012; Martín & Osorio, 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Nicholls et al., 2015; Pérez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016; Daniels et al., 2017; Nicholls et al., 2017).

En el ciclo R5 se identifica que uso de insumos externos (agroquímicos y combustibles fósiles) que aumentan la energía inyectada al agroecosistema proveniente del exterior. El agroecosistema cuenta con el potencial de aprovechamiento de fuentes renovables de energía que están constituidas por los alimentos producidos, la mano de obra, el trabajo animal, la producción y uso de fertilizantes e insumos orgánicos a través de prácticas como el compostaje y los abonos verdes. Las relaciones identificadas promueven la integración y el cierre de ciclos, aumentando la eficiencia energética en el agroecosistema y reduciendo el uso de insumos externos (Shi & Gill, 2005; Funes-Monzote, 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016).

Los indicadores del ciclo R5, valoran SE de regulación como la asimilación de residuos (Rar-21), SE de formación de suelo y regulación de nutrientes (Rfs-16, Rfs-19) y SE de producción relacionados con la conversión de energía solar en biomasa (Pmp-37). Mediante la incorporación al suelo de los residuos provenientes del manejo de las cosechas y de los animales, la conversión de energía solar en biomasa y la producción de abonos verdes, alimentos y leña, se favorecen los flujos de materia y energía, se conserva la productividad en las tierras, se promueve la biología del suelo y se producen combustibles y energía (Shi & Gill, 2005; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; De Souza et al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Machado et al., 2015; Nicholls et al., 2015; Pérez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016; Sayago, 2016; Nicholls et al., 2017; Güldner & Krausmann, 2017).

El ciclo R6 es un ciclo reforzado entre los indicadores materia orgánica y actividad biológica en el suelo. La adición de materia orgánica proveniente del compostaje de residuos de las cosechas y de los animales mejora la actividad biológica en el suelo. Aspecto verificable con el aumento de lombrices y artrópodos que contribuyen a la descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de residuos (Portela & Rademacher, 2001; Altieri & Nicholls, 2002; Vásquez-Vela, 2014; IAD, 2017).

Los SE valorados en el ciclo R6 están relacionados con funciones de regulación como la retención del suelo (Rrs-14), la formación del suelo, la regulación de nutrientes (Rfs-18, Rfs-19) y la asimilación de residuos (Rar-21). Además, con SE de Hábitat (Hab-28, Hab-29) y SE de mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-31). Mediante la incorporación de residuos se promueve la biología del suelo mejorando la producción, la movilización de nutrientes y se conservan las tierras cultivables y productivas (Rositano & Ferraro, 2014; Machado et al., 2015; Nicholls et al., 2015; Pérez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016; Sayago, 2016; Vargas & Osorio, 2016; Nicholls et al., 2017; Güldner & Krausmann, 2017; Swagemakers et al., 2017).

En el ciclo R7, se identifica que el aumento de la actividad biológica en el suelo por la adición de materia orgánica, genera mayor retención de humedad y mejor desarrollo de raíces. Además, contribuye a aumentar la profundidad efectiva, reduce la compactación y aporta nutrientes derivados del proceso de descomposición. (Portela & Rademacher, 2001; Altieri & Nicholls, 2002; Moraga et al., 2012; Vásquez-Vela, 2014; IAD, 2017). En el ciclo R7 los SE valorados son: la retención del suelo (Rrs-14, Rrs-15), la formación del suelo (Rfs-18, Rfs-19) y la asimilación de residuos (Rar-21). Los SE valorados derivados de las funciones de hábitat son: el mantenimiento y la generación de condiciones de refugio y alimentación (Hab-28, Hab-29) y el mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-31) (De Souza et al., 2012; Cerdán et al., 2012; Bacon et al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Tsonkova et al., 2014; Machado et al., 2015; Sayago, 2016; Gutiérrez et al., 2016; Hossain et al., 2017).

En el ciclo R8 se estudian las relaciones sobre el indicador “agua azul”, el cual representa el volumen de agua de riego usada por el cultivo con relación a la producción del cultivo. Por tanto, si se mejoran las prácticas de cosecha, protección y uso eficiente de agua, el agua azul puede reducirse. Si se disminuye la cantidad de agua que requiere el cultivo, se reduce el índice de escasez de agua (Farfan & Mestre, 2004; Reinoso, Durango & Sandoval, 2011; Cardona & Ochoa, 2013; Ferreira et al., 2016). La valoración de SE en el ciclo R8 se deriva de las funciones de regulación, especialmente de regulación hídrica (Rh-8, Rh-9, Rh-10, Rh-11), abastecimiento de agua (Raa-13), prevención de alteraciones y resiliencia (Rpa-6, Rpa-7). Las prácticas de cosecha y uso eficiente de agua derivan en SE como la resiliencia del agroecosistema que puede adaptarse a condiciones cambiantes manteniendo la productividad. El aumento de la disponibilidad de agua para riego, consumo animal y humano se deriva de la implementación de estrategias de riego natural, conservación de la humedad en el suelo y cosecha de agua (Portela & Rademacher, 2001; Harris, 2003; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; De Souza et al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Nicholls et al., 2015; Pérez et al., 2015; Ferreira et al., 2016; Gutiérrez et al., 2016; Sayago, 2016; Nicholls et al., 2017).

Finalmente, dentro de las hipótesis dinámicas de la dimensión ecológica, se identifica el ciclo balanceado B1. En el ciclo B1 se observa que la disponibilidad de agua para el cultivo, derivada de la implementación de prácticas de cosecha, protección y uso eficiente, reduce el volumen de agua azul requerida (Farfan & Mestre, 2004; Reinoso, Durango & Sandoval, 2011; Cardona & Ochoa, 2013). Los SE valorados mediante el indicador disponibilidad de agua para cultivo en el suelo, se relacionan con funciones de regulación hídrica (Rh-9, Rh-10, Rh-11) y abastecimiento de agua (Raa-13).

4.2.2 Ciclos causales de la dimensión sociocultural

En esta dimensión del valor se identifican 9 ciclos reforzados (R9 al R17) y un (1) ciclo balanceado (B2) (figura 4-2). Los indicadores y SE valorados para cada uno de los principios y criterios de la dimensión sociocultural se relacionan en la tabla 4-2 y en el anexo C.

Tabla 4-2. Indicadores de la dimensión sociocultural de valoración de SE

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).					
Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).					
Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados	
Principio 4 – CSoc-10					
Pérdida de cosechas (PC)	% (Autor, 2018) basado en (Bustamante, Casanova, Numa & Monterrey, 2004)	R	Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7	
			Polinización	Rp-23	
			Control biológico	Rcb-24, 25 y 26	
			Regulación del microclima	Rc-4 y 5	
Autosuficiencia alimentaria (AsA)	# (Sarandón et al., 2008)	R	Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7	
			H Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb-30	
			P Alimentos	Pa-32, 33 y 34	
Índice de seguridad alimentaria (ISA)	# (Autor, 2018) adaptado del índice de seguridad alimentaria global (http://foodsecurityindex.eiu.com/)	P	Alimentos	Pa-32, 33 y 34	
			R Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7	
Diversificación de la producción (A1)	# (Sarandón et al., 2008)	R	Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7	
			P Alimentos	Pa-32, 33 y 34	
Gasto en alimentos (GA)	# (Sarandón et al., 2008)	P	Alimentos	Pa-32 Pa-34	
Principio 4 – CSoc-11					
Aporte de proteína animal y derivados a la alimentación (APAA)	% Autor, (2018) basado en (Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Alimentos	Pa-32 y 34	
Producción de forrajes y alimentos para animales (PFAA)	% Autor (2018) basado en (Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P H	Materias primas Hábitat	Pmp-38 Hab-28	
Alimentos producidos para autoconsumo (APA)	% (Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Alimentos	Pa-32 y 34	
Disponibilidad de cosechas para autoconsumo (D)	# Autor (2018) basado en (Pirachicán-Avila, 2015)	P	Alimentos	Pa-32 y 34	
Principio 4 – CSoc-12					
Personas alimentadas por aportes de proteína (Pp)	# Pp /ha año (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Alimentos	Pa-32 y 34	
Personas alimentadas por aportes de energía (de origen animal o vegetal) (Pe)	# Pe por energía /ha año (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Alimentos	Pa-32 y 34	
Alimentos no producidos en el agroecosistema (ANPA)	% Autor (2018) basado en (Pirachicán-Avila, 2015)	P	Alimentos	Pa-32 y 34	
Principio 4 – CSoc-13					
Desnutrición (Índice de masa corporal-IMC)	# (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012)	P	Alimentos	Pa-32 Pa-34	
Alimentación de la familia por autoconsumo en nutrientes y calorías (ANC)	% (Pirachicán-Avila, 2015)	P	Alimentos	Pa-32 y 34	
Principio 4 – CSoc-14					
Personas alimentadas por aportes de energía (de origen animal o vegetal) (Pe)	# Pe /ha año (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Alimentos	Pa-32 y 34	

128 Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
Especies que aportan a la seguridad alimentaria (Esa)	# especies	(Pirachicán-Avila, 2015)	H P I	Mantenimiento de la diversidad biológica Recursos genéticos Enriquecimiento cultural y artístico Enriquecimiento histórico y espiritual Desarrollo cognitivo: ciencia y educación
Asociaciones o agrupaciones en redes de comercialización orgánica y de comercio justo (ARCJ)	#		R	Regulación de gases (mitigación del cambio climático) Regulación del microclima Prevención de alteraciones (resiliencia) Formación del suelo y regulación de nutrientes Control biológico
Comercialización de productos bajo certificaciones orgánicas o redes de comercio justo (CPCJ)	%	Autor (2018) basado en (Aguilar-Ruiz, 2012)	H	Hábitat
Comercialización en mercados locales (CML)	%		P	Alimentos Materias primas Recursos genéticos
Comercialización en mercados nacionales (CMN)	%		P	Alimentos Materias primas Recursos genéticos
Principio 5 – CSoc-15 y CSoc-16				
Tierras en producción en organizaciones campesinas (TPOC)	%	Autor (2018) basado en (Aguilar-Ruiz, 2012)	P	Materias primas Recursos genéticos
Área del agroecosistema mayor (AAM)	ha	Autor (2018) basado en (León, 2014)	P	Alimentos Materias primas Recursos genéticos
Producción comercializada a través de organizaciones (PCO)	%	Autor (2018) basado en (Aguilar-Ruiz, 2012)	P	Alimentos Materias primas Recursos genéticos
Participación en asociaciones o agrupaciones (PAA)	# personas	Autor (2018) basado en (Pirachicán-Avila, 2015; Giraldo-Betancur & Salinas-Mejía, 2009)	P	Alimentos Materias primas Recursos genéticos
Agrupaciones o asociaciones (AA)	#		R	Prevención de alteraciones (resiliencia)
Principio 5 – CSoc-17				
Conocimiento y conciencia ecológica (CCE)	#	(Sarandón et al., 2008)	R H P I	Prevención de alteraciones (resiliencia) Regulación hídrica Abastecimiento de agua Retención del suelo Asimilación de residuos Hábitat Mantenimiento de la diversidad biológica Recursos genéticos Recursos medicinales Recursos ornamentales Recursos estéticos Enriquecimiento cultural y artístico Enriquecimiento histórico y espiritual Desarrollo cognitivo: ciencia y educación
Empoderamiento de la producción (Ep)	#	Autor (2018) basado en (González-Esquivel, Ríos-Granados, Brunett-Pérez,	P	Alimentos Materias primas
	#			

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
Generación de proyectos de desarrollo local (GPDL)	\$/año	Zamorano-Camiro & Villa-Méndez, 2006) Principio 6 – CSoc-18		Recursos genéticos Pps-40
Acceso a agua potable (AAP)	#	Autor (2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	R	Regulación hídrica Rh-8 al 12 Abastecimiento de agua Raa-13 Retención de suelo Rrs-14 y 15 Asimilación de residuos Rar-22
Disponibilidad de agua para riego de cultivos (DAR)	#		P	Alimentos Pa-32 al 34 Materias primas Pmp-35 al 39 Recursos genéticos Pps-40
Acceso a semillas y variedades adaptadas a condiciones locales (ASVAL)	#	Autor (2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)		Principio 6 – CSoc-19
Índice de distribución de la tierra (Gini _{tierra})	#	(Sánchez-Morales, 2017)	P	Alimentos Pa-32 al 34 Materias primas Pmp-35 al 39
Índice de distribución de la productividad (Gini _{prod})	#			Recursos genéticos Pps-40
				Principio 7 – CSoc-20
Participación de mujeres en concejos comunitarios	#/año	Autor (2018) basado en (González-Esquível, Ríos-Granados, Brunett-Pérez, Zamorano-Camiro & Villa-Méndez, 2006)	I	Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 lehe-48 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
Integración social (IS)	#	Autor (2018) basado en (González-Esquível, Ríos-Granados, Brunett-Pérez, Zamorano-Camiro & Villa-Méndez, 2006)	I	Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 y 48 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
				Principio 7 – CSoc-21
Resolución de conflictos por acceso y uso de recursos naturales (RC)	#	Autor (2018) basado en (González-Esquível, Ríos-Granados, Brunett-Pérez, Zamorano-Camiro & Villa-Méndez, 2006)	R	Abastecimiento de agua Raa-13 Regulación hídrica Rh-8 al 12 Retención de suelo Rrs-14 y 15 Asimilación de residuos Rar-22
Tasa neta de migración (TM)	# personas/año	Autor (2018) basado en (Rosales-Martínez, Martínez-Dávila & Galicia-Galicia, 2015)	P	Alimentos Pa-32
			I	Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46
			R	Abastecimiento de agua Raa-13 Regulación hídrica Rh-11 Alimentos Pa-32 al 34
			P	Materias primas Pmp-35 al 39 Recursos genéticos Pps-40
			R	Abastecimiento de agua Raa-13 Regulación hídrica Rh-8 al 12 Retención de suelo Rrs-14 y 15
Población beneficiada (PB)	# de pobladores beneficiados	Autor (2018) basado en (Díaz-Gutiérrez & Orellana-Rodríguez, 2011)	I	Asimilación de residuos Rar-22 Recursos estéticos Ire-43 y 44 Recreación Ir-45 Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 y 48 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
			P	Recursos estéticos Ire-43 y 44 Recreación Ir-45
Sentido de comunidad (convivencia y lazos comunitarios)	#	(Shi & Gill, 2005)	I	Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 y 48 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49

Fuente: autor (2018)

En el ciclo balanceado B2 se identifican los indicadores diversificación de la producción, pérdida de cosechas, autosuficiencia alimentaria e índice de seguridad alimentaria. El ciclo identifica la importancia de la diversificación en la producción, como estrategia para reducir posibles pérdidas de cosechas causadas por eventos extremos o cambios de condiciones. A su vez, la diversificación mejora la autosuficiencia alimentaria y el índice de seguridad alimentaria en el agroecosistema (Bustamante et al., 2004; Sarandón et al., 2008).

En el ciclo B2, se resalta que para lograr un mejor índice de seguridad alimentaria se requiere de los SE de producción de alimentos (Pa-32, Pa-34) y producción de materias primas (Pmp-38). Además de los SE de regulación como la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7), la polinización (Rp-23), el control biológico (Rcb-24, Rcb-25, Rcb-26) y la regulación del microclima (Rc-4, Rc-5). Al reconocerse la importancia de los SE referenciados, se les otorga valor desde las dimensiones sociocultural y ecológica (Dale & Polasky, 2007; Power, 2010; Altieri et al., 2012; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; Martín & Osorio, 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Gutiérrez et al., 2016; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017).

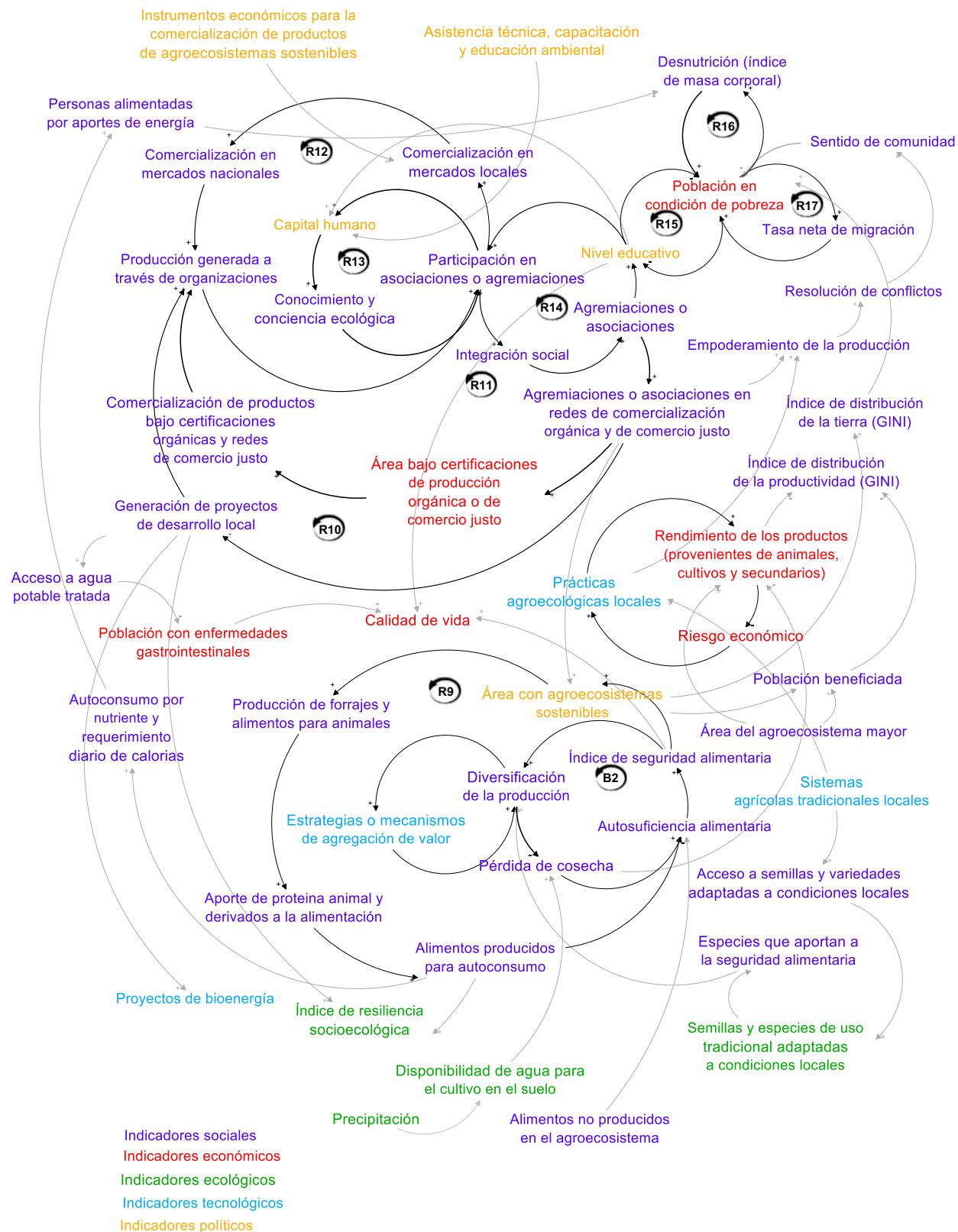
El ciclo reforzado R9 identifica el indicador área con agroecosistemas sostenibles (indicador de la dimensión política). Se plantea la hipótesis que una mayor área con agroecosistemas sostenibles aumenta la producción de proteína animal y derivados, además de la proporción de alimentos producidos para autoconsumo, mejorando la autosuficiencia alimentaria y el índice de seguridad alimentaria. La hipótesis dinámica plantea que un mejor índice de seguridad alimentaria genera un aumento de las áreas con agroecosistemas sostenibles (Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016).

Mediante los indicadores planteados en el ciclo R9, se valoran SE de producción de alimentos (Pa-32, Pa-34), producción de materias primas (Pmp-38) y SE relacionados con la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7). Se valora la conversión de energía solar en biomasa, mediante los cultivos y la producción de proteína animal o sus derivados. SE qué mejoran la autosuficiencia alimentaria, el índice de seguridad alimentaria y la adaptación del agroecosistema a condiciones cambiantes (Shi & Gill, 2005; Dale & Polasky, 2007; Power, 2010; Altieri et al., 2012; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; Martín & Osorio, 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Casimiro-Rodríguez, 2016; Gutiérrez et al., 2016; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017).

En el ciclo R10, la hipótesis dinámica plantea la importancia que las asociaciones o agremiaciones campesinas tienen en el agroecosistema sostenible. Las asociaciones pueden tener un impacto positivo en la generación de proyectos de desarrollo local y de producción, proyectos que generan mayor participación de la comunidad e integración social, aumentando el número de agremiaciones o asociaciones en redes de comercialización.

Los indicadores involucrados en la hipótesis dinámica R10 permiten valorar SE relacionados con funciones de información. Por medio de las asociaciones se generan proyectos productivos que conservan los sistemas agrícolas patrimoniales, el conocimiento y los usos de las especies locales (González-Esquível, Ríos-Granados, Brunett-Pérez, Zamorano-Camiro & Villa-Méndez, 2006; Feres & Villatoro, 2007; Giraldo-Betancur & Salinas-Mejía, 2009; Aguilar-Ruiz, 2012; Pirachicán-Avila, 2015).

Figura 4-2. Ciclos causales de la dimensión sociocultural de valoración de SE



Fuente: autor (2018)

Mediante los indicadores planteados en el ciclo R10, se valoran SE de regulación asociados a la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7), la mitigación del cambio climático (Rg-1, Rg-2, Rg-3), la regulación del microclima (Rc-4, Rc-5), la formación del suelo (Rfs-18) y el control biológico (Rcb-24, Rcb-25). Se valoran SE de hábitat (Hab-28, Hab-29), SE de producción de materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39), recursos genéticos (Pps-40) y alimentos (Ppa-32, Ppa-33, Pps-34). Además, se valoran funciones de información sobre recursos estéticos (Ire-43, Ire-44), recreación (Ir-45), enriquecimiento cultural y artístico (Ieca-46), enriquecimiento histórico e espiritual (Iehe-47, Iehe-48) y desarrollo cognitivo, ciencia y educación (Idce-49) (Altieri, 2002; Gillison et al., 2004; Bacon et al., 2012; De Souza et al., 2012; Pérez et al., 2015; Bravo-Monroy et al., 2016; Gutiérrez et al., 2016; Winkler & Nicholas, 2016; Hoffmann, 2017; Nicholls et al., 2017).

La hipótesis dinámica del ciclo R11 plantea que un mayor número de asociaciones o agremiaciones puede promover una mayor participación en redes de comercialización de producción orgánica y de comercio justo. Hipótesis que favorece los agroecosistemas con producción bajo certificaciones y el aumento de la comercialización a través de organizaciones. Las dinámicas identificadas impulsan la participación de las comunidades, generando mayor integración social y retroalimentando positivamente el crecimiento de las asociaciones y agremiaciones a nivel local y regional (González-Esquivel, Ríos-Granados, Brunett-Pérez, Zamorano-Camiro & Villa-Méndez, 2006; Feres & Villatoro, 2007; Giraldo-Betancur & Salinas-Mejía, 2009; Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Aguilar-Ruiz, 2012; Pirachicán-Avila, 2015; Casimiro-Rodríguez, 2016).

El ciclo causal R11 identifica la importancia de la participación de las agremiaciones o asociaciones en redes de comercio justo. Las certificaciones de proceso y producto que valoran el cuidado ecológico y la preservación de funciones y SE, garantizan el comercio del producto certificado en mercados internacionales y con precios de mayor margen de rentabilidad. Los indicadores involucrados en el ciclo R11 permiten determinar la importancia de SE de producción de materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39) y alimentos (Ppa-32, Ppa-33, Pps-34). SE de información, como el enriquecimiento cultural y artístico (Ieca-46), el enriquecimiento histórico y espiritual (Iehe-47, Iehe-48), el desarrollo cognitivo, ciencia y educación (Idce-49).

Las asociaciones campesinas con producción certificada se benefician de funciones y SE de información como la conservación de tradiciones y costumbres, la conservación de sistemas agrícolas patrimoniales y la generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Martínez, 2002; Gillison et al., 2004; Feres & Villatoro, 2007; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; De Souza et al., 2012; Pérez et al., 2015; Bravo-Monroy et al., 2016; Sánchez & Muñoz, 2016; Winkler & Nicholas, 2016; Hoffmann, 2017; Nicholls et al., 2017).

El ciclo R12, resalta la participación de las comunidades locales en asociaciones o agremiaciones que contribuyen a la comercialización de sus productos en mercados locales y nacionales. Las dinámicas aumentan la producción y la participación de la comunidad en las asociaciones (Aguilar-Ruiz, 2012). Los SE valorados en el ciclo R12 se derivan de las funciones de prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7). Además, se valoran funciones de producción de alimentos (Pa-32, Pa-33, Pa-34), materias primas (Pmp-35, Pmp-39, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39), recursos genéticos (Pps-40), recursos medicinales (Prm-41) y recursos ornamentales (Pro-42).

El ciclo R13 incluye los indicadores participación en asociaciones o agremiaciones, capital humano, conocimiento y conciencia ecológica. La hipótesis plantea que, a mayor participación de la comunidad en las asociaciones, se genera un mayor conocimiento y conciencia ecológica.

Conocimiento productivo, ambiental y ecológico, al conocer la importancia de las funciones y SE de regulación, hábitat, producción e información y su aporte a la sostenibilidad del agroecosistema (Feres & Villatoro, 2007; Sarandón et al., 2008; Giraldo-Betancur & Salinas-Mejía, 2009; Pirachicán-Avila, 2015).

Los SE valorados en el ciclo R13 se derivan de funciones de información, en cuanto a recursos estéticos (Ire-43), enriquecimiento cultural y artístico (Ieca-46), enriquecimiento histórico (Iehe-47, Iehe-48) y desarrollo cognitivo (Idce-49). Igualmente, se valoran los SE derivados de las funciones de regulación como la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7), la regulación hídrica (Rh-11), el abastecimiento de agua (Raa-13), la retención del suelo (Rrs-14, Rrs-15) y la asimilación de residuos (Rar-22). También los SE de hábitat (Hab-29) y mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-30, Hmdb-31). Finalmente, se valoran los SE generados por las funciones de producción de recursos genéticos (Pps-40) y de recursos medicinales (Prm-41) (Avellaneda-Torres et al., 2014; Sarandón & Flores, 2014; Barrezueta, 2015; López et al., 2016; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017; Vázquez & Martínez, 2017).

En la hipótesis dinámica representada en el ciclo R14, se incluyen los indicadores participación en asociaciones o agremiaciones, número de agremiaciones o asociaciones, integración social y nivel educativo. La hipótesis plantea que el nivel educativo se refuerza por las capacitaciones y la trasferencia de conocimiento a través de las organizaciones campesinas, situación que deriva en una mayor participación de las comunidades en las organizaciones. La participación genera mayor integración social impactando las agremiaciones o asociaciones de manera positiva (González-Esquivel, Ríos-Granados, Brunett-Pérez, Zamorano-Camiro & Villa-Méndez, 2006; Feres & Villatoro, 2007). Los SE incluidos por los indicadores en el ciclo R14, se derivan de las funciones de información especialmente el enriquecimiento cultural y artístico (Ieca-16), y el enriquecimiento histórico y espiritual (Iehe-47, Iehe-48) (Gillison et al., 2004; Feres & Villatoro, 2007; Bacon et al., 2012; Pérez et al., 2015; Winkler & Nicholas, 2016; Hoffmann, 2017).

Los ciclos R15, R16 y R17, involucran los indicadores nivel educativo, población en condición de pobreza, desnutrición y tasa neta de migración. La hipótesis del ciclo R15 plantea que un mayor nivel educativo reduce la población en condición de pobreza. Igualmente, una mayor población en condición de pobreza reduce el nivel educativo. Asimismo, en el ciclo R16 se plantea que un incremento en la población en condición de pobreza aumenta la población con desnutrición (índice de masa corporal). Igualmente, a mayor población en condición de pobreza mayor tasa neta de migración (ciclo R17) (Portela, 2001; Funes-Monzote et al., 2011; Valdivieso, 2011; Altieri et al., 2012; Rosales-Martínez, Martínez-Dávila & Galicia-Galicia, 2015; Villegas-Palacios et al., 2016).

En los ciclos R15, R16 y R17 se valoran los SE que contribuyen a reducir la población en condición de pobreza. Se valoran los SE relacionados con la regulación hídrica (Rh-11), el abastecimiento de agua (Raa-13), la formación del suelo y la regulación de nutrientes (Rfs-16). Los SE de producción de alimentos (Pa-32, Pa-34), materias primas (Pm-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39), recursos genéticos (Pps-40), recursos medicinales (Prm-41) y recursos ornamentales.

También se valoran los SE que incrementan el sentido de comunidad, la resolución de conflictos y el empoderamiento de la producción, como la recreación (Ir-45), el enriquecimiento cultural (Ieca-46) y el desarrollo cognitivo (Idce-49) (Altieri, 2002; Beer et al., 2003; Moonen & Barberi, 2008; Nicholls et al., 2015; Sayago, 2016; Ferreira et al., 2016; Gutiérrez et al., 2016; Villegas-Palacios et al., 2016).

4.2.3 Ciclos causales de la dimensión económica

Los ciclos causales identificados en la dimensión de valor económico se presentan en la tabla 4-3 y en la figura 4-3. En esta dimensión del valor se identifican cinco ciclos reforzados (R18 al R22).

Tabla 4-3. Indicadores de la dimensión económica de valoración de SE

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).					
Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).					
Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados	
Principio 9 – CEcon-25					
Balance energético (BE)	MJ/kg	(Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	R	Asimilación de residuos Alimentos	Rar-21 Pa-32
	MJ Producidos/ MJ Importados		P	Materias primas	Pmp-36 al 39
	MJ / ha año				
Productividad energética (Pe)	(MJ/ton)	(Mora-Delgado, 2004)	P	Alimentos Materias primas Recursos genéticos Recursos medicinales Recursos ornamentales	Pa-32 al 34 Pmp-35 al 39 Pps-40 Prm-41 Pro-42
				Asimilación de residuos	Rar-21
			R		
Principio 9 – CEcon-26					
Rendimiento de los productos (RP)	kg / ha año	(Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Alimentos Materias primas Recursos genéticos Recursos medicinales Recursos ornamentales	Pa-32 al 34 Pmp-35 al 39 Pps-40 Prm-41 Pro-42
				Asimilación de residuos	Rar-21
			R		
Producción de alimentos para consumo humano (PAH)	ton /ha /año	Autor (2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Alimentos	Pa-32 al 34
Producción de alimentos para consumo animal (PAA)	ton/ha /año	Autor (2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	R	Materias primas	Pmp-38
Variación en la Producción de alimentos para consumo humano (VPAH)	Ton /ha/año	(Autor, 2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Alimentos	Pa-32 al 34
			R	Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7
			P	Materias primas	Pmp-38
Variación en la Producción de alimentos para consumo animal (VPAA)	Kg/ha/año	(Autor, 2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	R	Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7
Riesgo económico (RE)	#	(Sarandón et al., 2008)	P	Alimentos Materias primas Recursos genéticos Recursos medicinales Recursos ornamentales Control biológico	Pa-32 al 34 Pmp-35 al 39 Pps-40 Prm-41 Pro-42 Rcb-24
				Formación de suelo y regulación de nutrientes	Rfs-16
				Abastecimiento de agua	Raa-13
			R		
Principio 9 – CEcon-27					
Diversificación de ingresos (DI)	#	(Osorio, Aramburo & Morales, 2011)	P	Materias primas Recursos genéticos Recursos medicinales Recursos ornamentales	Pmp-35 al 39 Pps-40 Prm-41 Pro-42
				Recursos estéticos	Ire-44
				Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 Rpa-7
			R	Regulación de gases Asimilación de residuos	Rg-1 Rar-21
Valorización de residuos (VR)	ton /ha/ año	Autor (2018) basado en (Funes-Monzote et al.,			

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
		2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Materias primas Pmp-37 al 39
Principio 9 – CEcon-28				
Diversidad en la producción (H _{DP})	#	(Funes-Monzote et al., 2011; Casimiro-Rodríguez, 2016)	P	Materias primas Pmp-35 al 39 Recurso medicinales Prm-41 Recurso ornamentales Pro-42
			R	Prevención de alteraciones (resiliencia) Alimentos Pa-32 al 34
Canales de comercialización (CC)	#	(Sarandón et al., 2008)	P	Materias primas Pmp-35 al 39 Recurso genéticos Pps-40 Alimentos Pa-32 al 34
Diversidad de cultivos (Dc)	Número	(Sarandón et al., 2008)	P	Materias primas Pmp-35 al 39 Recurso genéticos Pps-40
			R	Prevención de alteraciones (resiliencia) Alimentos Pa-32 al 34
			P	Materias primas Pmp-35 al 39 Recurso genéticos Pps-40
Área bajo certificaciones de producción orgánica o de comercio justo (APCO)	ha/año	Autor (2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	H	Hábitat Hab-28 y 29 Mantenimiento de la diversidad biológica Hmdb-30 y 31
			I	Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
				Regulación de gases Rg-1 al 3
				Regulación del microclima Rc4 y 5
				Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 y 7
			R	Regulación hídrica Rh-8 y 11 Retención de suelo Rrs-14 y 15
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-16, 17 y 20
				Asimilación de residuos Rar-21 y 22
				Polinización Rp-23
				Control biológico Rcb-25, 27 y 28
Calidad física y organoléptica de los productos (C)	#	Autor (2018) basado en (Heredia & Maribel, 2013)	P	Alimentos Pa-32 al 34
				Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-17
			R	Asimilación de residuos Rar-21 y 22
				Control biológico Rcb-24
Principio 9 – CEcon-29				
Insumos externos usados para la producción (IE)	% de insumos no generados o aprovechados en la finca	(Funes-Monzote et al., 2011; Casimiro-Rodríguez, 2016)	R	Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-17
				Alimentos (abonos verdes) Pa-33
			P	Materias primas Pmp-35 al 39
				Recurso genéticos Pps-40
Reducción de fertilizantes externos (RFE)	% fertilizantes ingresados de los producidos en el agroecosistema	(Osorio, Aramburo & Morales, 2011)	R	Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-16 al 20
				Asimilación de residuos Rar-21 y 22
			P	Materias primas Pmp-39
				Alimentos (abonos verdes) Pa-33
Dependencia de insumos externos (DIE)	%	Autor (2018) basado en (Sarandón et al., 2008)	R	Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-17
				Alimentos (abonos verdes) Pa-33
			P	Materias primas Pmp-35 al 39
				Recurso genéticos Pps-40
Prácticas de control biológico (PCB)	Número	Autor (2018) basado en (Nicholls, 2008)	R	Control biológico Rcb-24 al 27
				Hábitat Hab-28 y 29
			H	Mantenimiento de la diversidad biológica Hmdb-31
Principio 10 – CEcon-30				
Generación de empleo agrícola (GEA)	# Jornales externos generados/área	(Mora-Delgado, 2004)	P	Alimentos Pa-32 al 34 Materias primas Pmp-35 al 39 Recurso genéticos Pps-40 Recurso medicinal Prm-41

136 Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados			
Miembros activos de la unidad familia (MAUF)	#	Autor (2018) basado en (Mora-Delgado, 2004; Shi & Gill, 2005)	P	Recursos ornamentales Pro-42			
				I Recursos estéticos Ire-44			
				Alimentos Pa-32 al 34			
				Materias primas Pmp-35 al 39			
				Recursos genéticos Pps-40			
				Recursos medicinales Prm-41			
				Recursos ornamentales Pro-42			
				Alimentos Pa-32 y 34			
				Materias primas Pmp-35 al 39			
				Recursos genéticos Pps-40			
Población en condición de pobreza (índice de pobreza humana para países en desarrollo, IPH).	#	(Valdivieso, 2011)	R	Recursos medicinales Prm-41			
				Asimilación de residuos Rar-22			
				Abastecimiento de agua Raa-13			
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-16			
				Recreación Ir-45			
				I Enriquecimiento cultural y artístico leca-46			
				Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49			
				Alimentos Pa-32 al 34			
				Materias primas Pmp-35 al 39			
				Recursos genéticos Pps-40			
Tasa de desempleo (TD)	Porcentaje	(Valdivieso, 2011)	P	Recursos medicinales Prm-41			
				Recursos ornamentales Pro-42			
Principio 10 – CEcon-31							
I Enriquecimiento cultural y artístico leca-46							
Enriquecimiento histórico y espiritual lehe-47							
Calidad de vida (CV)	#	Autor (2018) basado en (Valdivieso, 2011)	I	Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49			
				R Asimilación de residuos Rar-22			
				Abastecimiento de agua Raa-13			
				P Alimentos Pa-32 al 34			
				Recursos estéticos Ire-43 y 44			
				Recreación Ir-45			
				I Enriquecimiento cultural y artístico leca-46			
				Enriquecimiento histórico y espiritual lehe-47 y 48			
				Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49			
				P Alimentos Pa-32 y 34			
Aceptabilidad del agroecosistema sostenible (AAS)	#	(Sarandón et al., 2008)	P	Materias primas Pmp-35 al 37			
				Recursos genéticos Pps-40			
				Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 y 7			
				R Retención de suelo Rrs-14			
				Control biológico Rcb-24			
				H Hábitat Hab-28 y 29			
				Alimentos Pa-32 al 34			
				Materias primas Pmp-35 al 39			
				Recursos genéticos Pps-40			
				Recursos ornamentales Pro-42			
Población por debajo del umbral de pobreza (PDUP)	%	(Valdivieso, 2011)	P	Asimilación de residuos Rar-22			
				Abastecimiento de agua Raa-13			
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-20			
				Asimilación de residuos Rar-22			
				R Abastecimiento de agua Raa-13			
Vida larga y saludable (VLS)	%	(Valdivieso, 2011)	R	Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-20			
				Asimilación de residuos Rar-22			
				R Abastecimiento de agua Raa-13			
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-20			
				Asimilación de residuos Rar-22			
Población con enfermedades gastrointestinales (PEG)	%	(Pérez, Navarro & Miranda, 2013)	R	Abastecimiento de agua Raa-13			
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-20			
				Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-16 al 20			
				Asimilación de residuos Rar-21 y 22			
				P Materias primas Pmp-39			
Población con enfermedades respiratorias (PER)	Porcentaje		R	Alimentos (abonos verdes) Pa-33			
				P Materias primas Pmp-39			

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
Promoción actividades recreativas (PAR)	Personas/año	Autor (2018)	I	Recurso estéticos Recreación Ire-43 y 44 Ir-45

Fuente: autor (2018)

En la dimensión económica se identifican cinco ciclos reforzados (R18 al R22). El ciclo reforzado R18, plantea que a mayor área de agroecosistemas sostenibles, se aumenta el número de productos generados (diversificación en la producción). Situación que contribuye a la diversificación de ingresos, mejorando la alimentación y la nutrición de las comunidades. La mejor calidad de vida conlleva a una mayor aceptabilidad del sistema productivo, incrementando las áreas en producción sostenible (Bockstael et al., 1995; Musacchio & Grant, 2002; Sarandón et al., 2008; Jogo & Hassan, 2010; Osorio, Aramburo & Morales, 2011; Valdivieso, 2011).

Los SE valorados en la hipótesis dinámica (R18) se derivan de las funciones de regulación, en cuanto a prevención de alteraciones (Rpa-6, Rap-7), abastecimiento de agua (Raa-13), formación del suelo y regulación de nutrientes (Rfs-20), asimilación de residuos (Rar-22), retención del suelo (Rrs-14) y control biológico (Rcb-24). Además, se valoran SE derivados de las funciones de hábitat (Hab-28, Hab-29) y mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-30). Funciones de producción de alimentos (Pa-32, Pa-33, Pa-34), materias primas derivadas de la conversión de energía solar en biomasa para ser utilizada en actividades humanas (De Groot et al., 2002) (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39), recursos genéticos (Pps-40), recursos medicinales (Prm-41) y recursos ornamentales (Pro-42). Funciones de información como recursos estéticos (Ire-43, Ire-44), recreación (Ir-45), enriquecimiento cultural y artístico (Ieca-46), enriquecimiento histórico y espiritual (Iehe-47, Iehe-48) y desarrollo cognitivo: ciencia y educación (Idce-49). Los SE valorados mejoran la diversificación de ingresos y el nivel de vida de los beneficiarios de los agroecosistemas, aumentando la aceptabilidad del sistema productivo (Harris, 2003; Dale & Polasky, 2007; Power, 2010; Altieri et al., 2012; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; De Souza et al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Pérez et al., 2015; Nicholls et al., 2015; Nicholls et al., 2017).

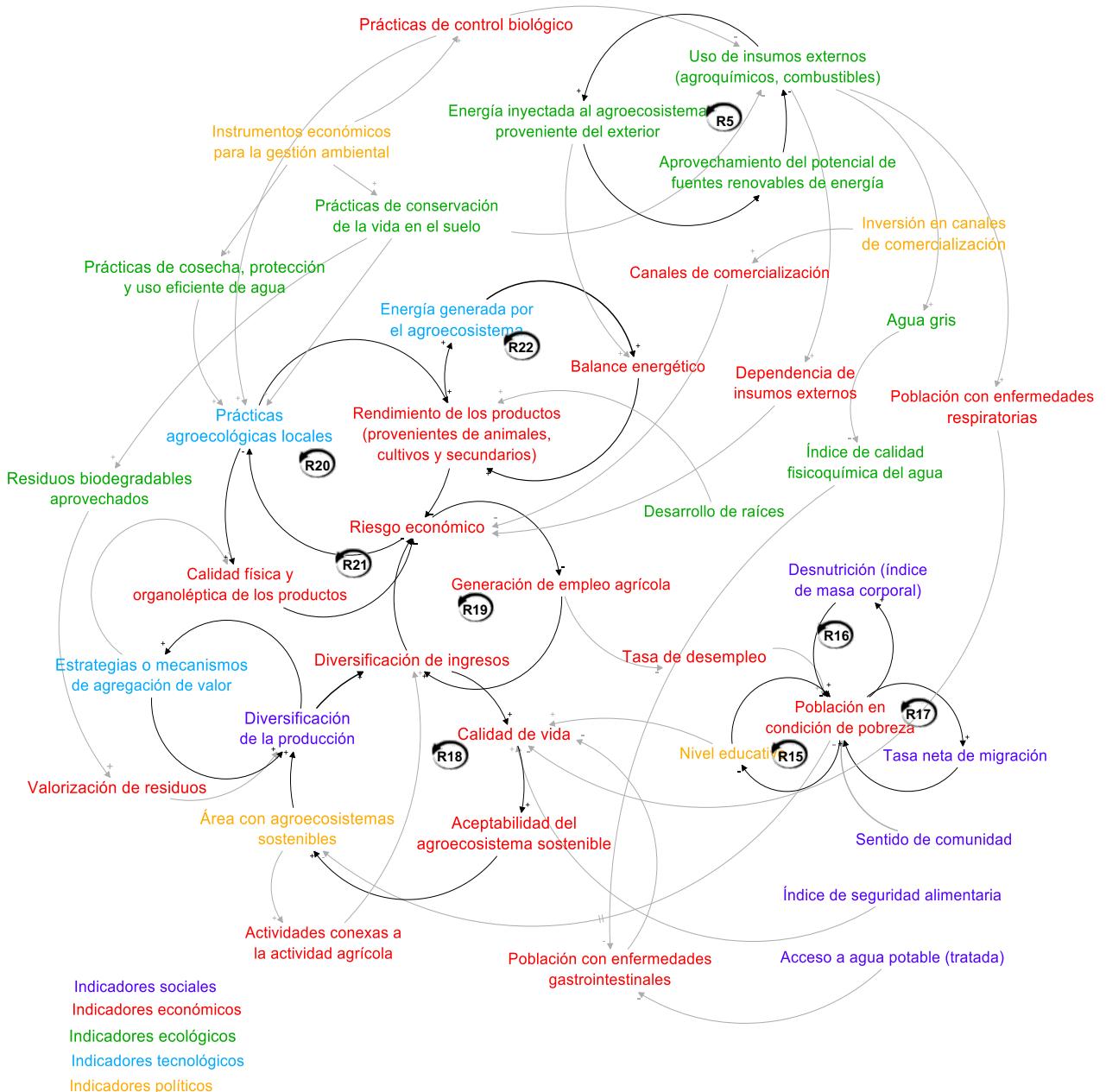
En el ciclo R19, los indicadores involucrados son diversificación de ingresos, generación de empleo agrícola y riesgo económico. La hipótesis plantea que una mayor diversificación de ingresos reduce el riesgo económico de la producción, aumentando la inversión y generando mayor empleo agrícola (Mora-Delgado, 2004; Osorio, Aramburo & Morales, 2011; Sarandón et al., 2008; Bautista, 2015; Gómez et al., 2015).

En el ciclo R19 se valoran SE de prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7), abastecimiento de agua (Raa-13), formación del suelo (Rfs-16) y control biológico (Rcb-24). Se valoran SE de producción de alimentos (Pa-32, Pa-33, Pa-34), materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39), recursos genéticos (Pps-40), recursos medicinales (Prm-41) y recursos ornamentales (Pro-42). En el ciclo R19 la reducción del riesgo económico, generada por la diversificación de ingresos y producción, valora SE de producción de alimentos, productos secundarios y actividades conexas. Además de SE como la reducción del daño a los cultivos por plagas o enfermedades, el mantenimiento de la productividad de las tierras y la disponibilidad de agua para riego y consumo (Rositano & Ferraro, 2014; Gómez et al., 2015; Ferreira et al., 2016; Gutiérrez et al., 2016; Sayago, 2016; Nicholls et al., 2017).

En el ciclo R20, se plantea que un menor riesgo económico incentiva el uso de prácticas agroecológicas locales, entendidas como las prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua, las prácticas de conservación de la vida en el suelo y las prácticas de control biológico. Las prácticas mejoran el rendimiento de los productos (cultivos, animales, productos secundarios)

reduciendo el riesgo económico en el agroecosistema (Sarandón et al., 2008; Abaunza et al., 2011; Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Gómez et al., 2015; Casimiro-Rodríguez, 2016).

Figura 4-3. Ciclos causales de la dimensión económica de valoración de SE



Fuente: autor (2018)

Los principales SE valorados en el ciclo R20 se relacionan con las funciones de regulación, como son el abastecimiento de agua (Raa-13), la retención, formación y regulación de nutrientes en el suelo (Rfs-16, Rfs-18, Rfs-19, Rfs-20) y el control biológico (Rcb-25, Rcb-26). Los SE valorados reducen las pérdidas de cosechas y mejoran los rendimientos, conservando a su vez funciones de hábitat (Hab-28, Hab-29) y mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-30, Hmdb-31).

(Abaunza et al., 2011; Pérez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016; Sayago, 2016; Vargas & Osorio, 2016; Güldner & Krausmann, 2017; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017).

En el ciclo R21 de la dimensión económica, se relacionan los indicadores riesgo económico, prácticas agroecológicas locales y calidad física y organoléptica de los productos. La hipótesis dinámica plantea que un menor riesgo económico incentiva el uso de prácticas agroecológicas locales, mejorando la calidad física y organoléptica de los productos. Al implementar prácticas de control biológico, se mejora la inocuidad de los productos derivada de la reducción de agroquímicos para el control de plagas o enfermedades. Al contar con agua suficiente para cubrir los requerimientos de los cultivos, se mejora el aspecto físico de los productos y se garantiza el contenido de humedad adecuado. Un producto con las condiciones adecuadas de comercialización reduce el riesgo económico (Sarandón et al., 2008; Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Heredia & Maribel, 2013; Gómez et al., 2015; Casimiro-Rodríguez, 2016).

Los principales SE valorados en el ciclo R21, se relacionan con funciones de regulación derivadas de la implementación de prácticas agroecológicas locales (agua, suelo y control biológico). Se valoran SE como la disponibilidad de agua para riego y consumo (Raa-13), el mantenimiento de la productividad de las tierras (Rfs-16) y la reducción de daños a los cultivos (Rcb-24). SE que mejoran la calidad física y organoléptica de los productos generados en el agroecosistema y reducen el riesgo económico (Sarandón et al., 2008; Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016; Ferreira et al., 2016).

El ciclo R22, relaciona los indicadores rendimiento de los productos, energía generada por el agroecosistema y balance energético. La hipótesis dinámica plantea que a mayor rendimiento de los productos (carne y derivados animales, cultivos, productos secundarios) se genera mayor energía en el agroecosistema (MJ/kg). A mayor energía generada, el balance energético resultante de la relación entre el volumen de producción agropecuaria, su contenido energético y el costo energético que implicó producir esa energía alimentaria con insumos externos, será mayor. Esta situación indica que se produce más energía que la que se introduce en el agroecosistema. Un mayor balance energético, aumenta el rendimiento de los productos en términos de energía (Shi & Gill, 2005; Abaunza et al., 2011; Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016).

El ciclo R22, se relaciona con el ciclo R3 (identificado en la dimensión ecológica) en el indicador balance energético, el cual es influenciado por la energía inyectada al agroecosistema proveniente del exterior, la reducción de insumos externos y el aprovechamiento del potencial de fuentes renovables de energía. Los SE valorados en el ciclo R22 se derivan de funciones de producción, específicamente la conversión de energía solar en biomasa. SE que aumentan la energía generada en el agroecosistema como la producción de alimentos (Pa-32, Pa-33, Pa-34), materias primas, combustibles, forrajes, alimentos para animales y fertilizantes (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39).

Los SE valorados contribuyen a generar un balance positivo entre la energía generada y la energía inyectada al agroecosistema. Se valoran además SE derivados de funciones de regulación como la asimilación de residuos y la incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21) (Altieri, 2002; Shi & Gill, 2005; Dale & Polasky, 2007; Power, 2010; Altieri et al., 2012; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; Martín & Osorio, 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Gutiérrez et al., 2016).

4.2.4 Ciclos causales de la dimensión tecnológica

Los ciclos causales de la dimensión de valor tecnológico se presentan en la figura 4-4. En la dimensión tecnológica se identifican 7 ciclos reforzados (R23 al R29).

Tabla 4-4. Indicadores de la dimensión tecnológica de valoración de SE

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#). Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).					
Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados	
Principio 8 – CTec-22					
Intensidad Innovadora en el agroecosistema (IIA)	% (Casimiro-Rodríguez, 2016)		R	Regulación del microclima	Rc-4 y 5
				Prevención de alteraciones (Resiliencia)	Rpa-6 y 7
				Regulación hídrica	Rh-9 al 11
				Abastecimiento de agua	Raa-13
				Retención de suelo	Rrs-14 y 15
				Formación de suelo y regulación de nutrientes	Rfs-16 al 20
				Asimilación de residuos	Rar-21 y 22
				Polinización	Rp-23
			P	Control biológico	Rcb-24 al 27
				Materias primas	Pmp-35 al 39
Estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV)	#	Autor (2018) basado en (Casimiro-Rodríguez, 2016; Castro, 2017)	P	Materias primas	Pmp-35 al 39
Tasa de generación de patentes, innovaciones y/o registros (TGP)	# (Casimiro-Rodríguez, 2016)		R	Control biológico	Rcb-24 al 27
				Regulación de gases (mitigación del cambio climático)	Rg-1 y 3
			P	Materias primas	Pmp-35 al 39
				Recursos genéticos	Pps-40
				Recursos medicinales	Prm-40
				Recursos ornamentales	Pro-42
			I	Recreación	Ir-45
				Desarrollo cognitivo: ciencia y educación	Idce-49
				Regulación de gases (mitigación del cambio climático)	Rg-1 al 3
				Regulación del microclima	Rc-4 y 5
Capacidad de cambio tecnológico (CCT)	# (Casimiro-Rodríguez, 2016)		R	Prevención de alteraciones (Resiliencia)	Rpa-6 y 7
				Regulación hídrica	Rh-9 al 11
				Abastecimiento de agua	Raa-13
				Retención de suelo	Rrs-14 y 15
				Formación de suelo y regulación de nutrientes	Rfs-16 al 20
				Asimilación de residuos	Rar-21 y 22
				Polinización	Rp-23
			P	Control biológico	Rcb-24 al 27
				Materias primas	Pmp-35 al 39
Principio 8 – CTec-23					
Energía generada por el agroecosistema (EGA)	% (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012)		R	Regulación de gases	Rg-1
				Asimilación de residuos	Rar-21
			P	Alimentos	Pa-32
				Materias primas	Pmp-36 al 39
Prácticas agroecológicas locales (PAL)	#	Autor (2018) basado en (Sarandón et al., 2008)	H	Habitat	Hab-28 y 29
				Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb-30 y 31
			R	Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7
				Regulación hídrica	Rh-8 al 12

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
Sistemas agrícolas tradicionales locales (SATL)	ton/ha			Abastecimiento de agua Raa-13 Retención de suelo Rrs-14 y 15 Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-16 al 20 Asimilación de residuos Rar-21 y 22 Polinización Rp-23 Control biológico Rcb-24 al 27 Recurso estéticos Ire43 y 44 Recreación Ir-45 Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 I Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 y 48 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49 Alimentos Pa-32 al 34 Materias primas Pmp-35 al 39 P Recursos genéticos Pps-40 Recursos medicinales Prm-41 Recursos ornamentales Pro-42
Principio 8 – CTec-24				
Energía renovable utilizada en el agroecosistema (ER)	%	Autor (2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012)	R P	Asimilación de residuos Rar-21 Alimentos Pa-32 al 34 Materias primas Pmp-36 al 39 Recursos genéticos Pps-40
Proyectos de bioenergía	#	(Shi & Gill, 2005)	R P	Asimilación de residuos Rar-21 Alimentos Pa-32 al 34 Materias primas Pmp-36 al 39 Recursos genéticos Pps-40
Índice de seguridad energética (ISE)	#	(Casimiro-Rodríguez, 2016)	R P	Asimilación de residuos Rar-21 Alimentos Pa-32 al 34 Materias primas Pmp-36 al 39
Índice de diversidad energética (He)	#	(Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012)	P	Materias primas Pmp-35 al 39

Fuente: autor (2018)

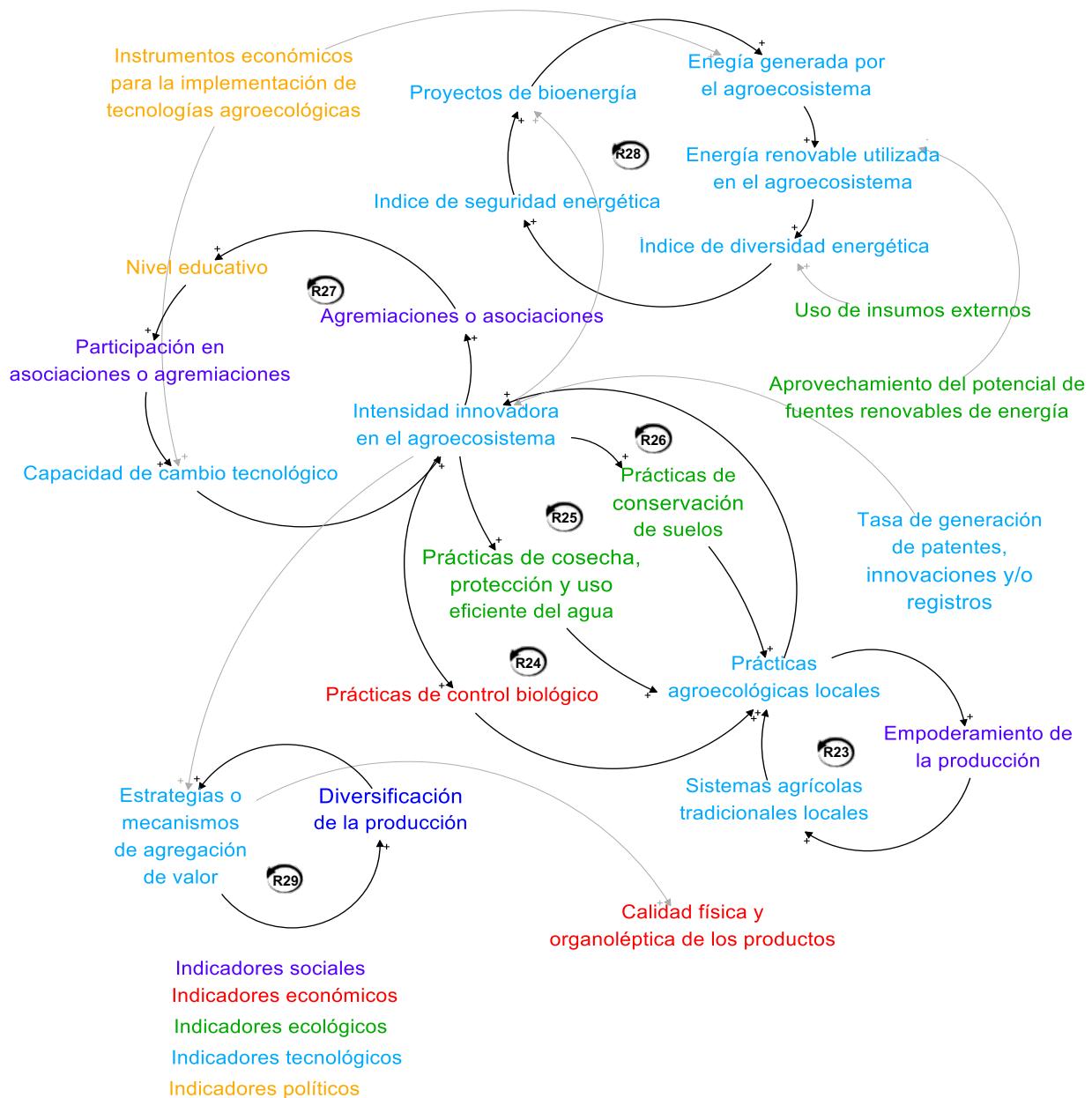
En el ciclo R23 de la dimensión tecnológica, se relacionan los indicadores, sistemas agrícolas tradicionales o patrimoniales, prácticas agroecológicas locales y empoderamiento de la producción (tabla 4-4). La hipótesis plantea que a mayor área y producción derivada de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales se implementan más prácticas agroecológicas, en cuanto a manejo de agua, suelo, abonos, control biológico, especies y variedades. Generando un mayor empoderamiento de la producción, retroalimentando y favoreciendo el mantenimiento de los sistemas agrícolas locales (González-Esquível, Ríos-Granados et al., 2006, Sarandón et al., 2008; Bravo-Monroy et al., 2016).

Los SE identificados en el ciclo R23, derivan de las tecnologías desarrolladas en los sistemas agrícolas tradicionales locales que influencian las prácticas de cosecha, protección y uso eficiente de agua, conservación del suelo y control biológico. Tecnologías dentro de las cuales se relacionan técnicas de labranza, producción de abonos, manejo de materia orgánica, cobertura, rotación y diversificación de cultivos, arreglos agrícolas, especies y variedades implementadas (Dale & Polasky, 2007; Power, 2010; Altieri et al., 2012). Los sistemas agrícolas tradicionales locales generan además SE derivados de las funciones de información, como la generación y conservación de tradiciones y costumbres, el uso de especies con fines religiosos, espirituales o históricos y la generación de conocimiento sobre la diversidad de especies (Bravo-Monroy et al., 2016; Sayago, 2016; Gutiérrez et al., 2016; Nicholls et al., 2017).

Los SE valorados en el ciclo R23 se derivan de las funciones de regulación, como la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7), la regulación hídrica (Rh-9, Rh-10, Rh-11, Rh-12), el

abastecimiento de agua (Raa-13), la retención del suelo (Rrs-14, Rrs-15), la formación de suelo (Rfs-16, Rfs-17, Rfs-18, Rfs-19, Rfs-20), la asimilación de residuos (Rar-21, Rar-22), la polinización (Rp-23) y el control biológico (Rcb-25, Rcb-26). Además de los SE de hábitat (Hab-28, Hab-29) y el mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-30, Hmdb-31). También se valoran los SE provenientes de las funciones de producción de alimentos (Pa-32, Pa-33, Pa-34), materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39), recursos genéticos (Pps-40), recursos medicinales (Prm-41) y recursos ornamentales (Pro-42). Finalmente, se valoran los SE de las funciones de información, como los recursos estéticos (Ire-43, Ire-44), la recreación (Ir-45), el enriquecimiento cultural y artístico (Ieca-46), el enriquecimiento histórico y espiritual (Iehe-47, Iehe-48) y el desarrollo cognitivo (Idce-49).

Figura 4-4. Ciclos causales de la dimensión tecnológica de valoración de SE



Fuente: autor (2018)

Los ciclos R24, R25 y R26, incluyen los indicadores intensidad innovadora en el agroecosistema, prácticas de control biológico, prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua y prácticas de conservación de suelos. La hipótesis plantea que, a mayor intensidad innovadora, entendida como la capacidad de innovación en el diseño y manejo agroecológico para elevar la eficiencia (Casimiro-Rodríguez, 2016), se generan más prácticas locales de control biológico, cosecha, protección, uso eficiente de agua y conservación de suelos, retroalimentado la intensidad innovadora (Nicholls, 2008; Sarandón et al., 2008; Abaunza et al., 2011; Cardona & Ochoa, 2013; Casimiro-Rodríguez, 2016).

El indicador intensidad innovadora influencia directamente las prácticas agroecológicas locales. Se valoran SE relacionados con el control biológico de plagas para reducir los daños generados a los cultivos, mediante la generación de hábitats para insectos benéficos que controlan poblaciones no deseadas a través de depredación, parasitoidismo y competencia. Otros SE se relacionan con la cosecha, protección y uso eficiente de agua, valorando el aumento de la resiliencia del agroecosistema y su capacidad de adaptación mediante la disponibilidad de agua para riego y consumo, la conservación de la humedad del suelo y principalmente el mantenimiento de la capacidad productiva. Se valoran además SE relacionados con la conservación del suelo y su fertilidad, como el mantenimiento de las tierras cultivables y la prevención de fenómenos como la erosión (Gillison et al., 2004; Khalajabadi, 2008; Moonen & Barberi, 2008; Abaunza et al., 2011; Altieri et al., 2012; De Souza et al., 2012; Martín & Osorio, 2012; Ferreira et al., 2016; Gutiérrez et al., 2016; Daniels et al., 2017; Nicholls et al., 2017).

Los SE valorados en los ciclos R24, R25 y R26 se derivan de las funciones de regulación, como la regulación del microclima (Rc4, Rc-5), la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7), la regulación hídrica (Rh-9, Rh-10, Rh-11), el abastecimiento de agua (Raa-13), la retención del suelo (Rrs-14, Rrs-15), la formación de suelo (Rfs-16, Rfs-17, Rfs-18, Rfs-19, Rfs-20), la asimilación de residuos (Rar-21, Rar-22), la polinización (Rp-23) y el control biológico (Rcb-24, Rcb-25, Rcb-26, Rcb-27). Al igual que los SE generados por las funciones de hábitat (Hab-28, Hab-29) y el mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-30, Hmdb-31). Finalmente, se valoran los SE provenientes de las funciones de producción de materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39).

En el ciclo R27, se incluyen los indicadores intensidad innovadora en el agroecosistema, número de asociaciones o agremiaciones, nivel educativo, participación en asociaciones o agremiaciones y capacidad de cambio tecnológico. La hipótesis dinámica para el ciclo R27 plantea que una mayor intensidad innovadora en el agroecosistema (capacidad de innovación en el diseño y manejo agroecológico para elevar la eficiencia) (Casimiro-Rodríguez, 2016), favorece la existencia y aumento del número de agremiaciones o asociaciones a nivel local y regional. Organizaciones que aportan en la implementación de prácticas agroecológicas y en el acceso a conocimientos sobre producción y nuevas tecnologías.

En esta dinámica, se aumenta la capacidad de cambio tecnológico, al desarrollar tecnologías propias y adaptar o asimilar tecnologías e innovaciones externas, generando un refuerzo positivo en la intensidad innovadora en el agroecosistema (Portela, 2001; Feres & Villatoro, 2007; Giraldo-Betancur & Salinas-Mejía, 2009; Abaunza et al., 2011; Pirachicán-Avila, 2015; Casimiro-Rodríguez, 2016; Ferreira et al., 2016).

En el ciclo R27, el indicador de capacidad de cambio tecnológico, entendido como la capacidad de generación, adaptación y asimilación de tecnologías propias o externas, permite valorar SE relacionados con el aumento de la eficiencia del agroecosistema. Es decir, aquellos SE que

contribuyen a la producción de alimentos para consumo humano, forrajes para consumo animal, carne y derivados. Igualmente, se valora la producción de combustibles, energía, abonos verdes, fertilizantes, semillas y especies adaptadas.

El indicador de capacidad de cambio tecnológico valora SE relacionados con la amortiguación de alteraciones o disturbios y la adaptación a condiciones cambiantes. Por ejemplo, se valoran SE que contribuyen a la eficiencia en el uso de recursos y la reducción de insumos externos, como la conservación del suelo productivo, la prevención de daños por erosión y la incorporación de residuos de cosechas y animales a flujos de materia y energía (Altieri, 2002; Shi & Gill, 2005; Harris, 2003; Rositano & Ferraro, 2014; Pérez et al., 2015; Nicholls et al., 2015; Nicholls et al., 2017).

El indicador número de agremiaciones o asociaciones valora SE que se relacionan con actividades conexas a la producción agrícola, como actividades recreativas, conservación de tradiciones y costumbres y generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Gillison et al., 2004; Feres & Villatoro, 2007; Bacon et al., 2012; Pérez et al., 2015; Bravo-Monroy et al., 2016; Winkler & Nicholas, 2016; Hoffmann, 2017).

Los SE valorados en el ciclo R27 se derivan de funciones de regulación como: la mitigación del cambio climático (Rg-1, Rg-2, Rg-3), la regulación del microclima (Rc4, Rc-5), la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7), la regulación hídrica (Rh-9, Rh-10, Rh-11), el abastecimiento de agua (Raa-13), la retención del suelo (Rrs-14, Rrs-15), la formación de suelo (Rfs-16, Rfs-17, Rfs-18, Rfs-19, Rfs-20), la asimilación de residuos (Rar-21, Rar-22), la polinización (Rp-23) y el control biológico (Rcb-24, Rcb-25, Rcb-26, Rcb-27). Igualmente, se valoran SE de producción de alimentos (Pa-32, Pa-33, Pa-34), materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39) y recursos genéticos (Pps-40). Finalmente, se valoran SE provenientes de las funciones de información, relacionados con los recursos estéticos (Ire-43, Ire-44), la recreación (Ir-45), el enriquecimiento cultural y artístico (leca-46), el enriquecimiento histórico (lehe-47, lehe-48) y el desarrollo cognitivo (Idce-49).

En el ciclo tecnológico R28 se incluyen los indicadores denominados: proyectos de bioenergía, energía generada por el agroecosistema, energía renovable utilizada por el agroecosistema, índice de diversidad energética e índice de seguridad energética. Los proyectos de bioenergía se relacionan con la generación de combustibles renovables de origen biológico, como la leña, el carbón de leña, el abono animal, el biogás y los cultivos energéticos (Hazell, 2009). La hipótesis dinámica plantea que los proyectos de bioenergía aumentan la energía generada, incrementando el uso de energía renovable, mejorando la diversidad energética y el índice de seguridad energética (Shi & Gill; 2005; Hazell, 2009; Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016).

En el ciclo R28 se valoran los SE que aportan a la generación de energías renovables. SE como la asimilación de residuos (Rar-21), al incorporar los residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía, aumentando la energía generada en forma de fertilizantes, reduciendo la dependencia de insumos externos y mejorando la seguridad energética. Se valoran los SE que permiten la conversión de energía solar en biomasa, como la producción de alimentos, forrajes, carne, derivados animales (Pa-32, Pa-33, pa-34) y productos secundarios (dendroenergía, fertilizantes, biogás, bioalcohol) (Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39). Además, se valoran SE de producción y conservación de material genético (Pps-40), al proveer semillas y especies locales adaptadas (Beer et al., 2003; Shi & Gill, 2005; Gillison et al., 2004; Khalajabadi, 2008; Moonen & Barberi, 2008; Rositano & Ferraro, 2014; Gutiérrez et al., 2016; Nicholls et al., 2017; Swagemakers et al., 2017).

El ciclo tecnológico R29 incluye los indicadores: estrategias o mecanismos de agregación de valor y diversificación de la producción. La hipótesis plantea que, a mayor diversificación de la producción (cultivos y derivados animales), se involucran nuevas estrategias o mecanismos de agregación de valor. Los SE valorados por los indicadores involucrados en el ciclo R29, se relacionan con funciones de producción de materias primas (Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39) y productos secundarios (leña, resinas, frutos, biocombustibles, abonos verdes y fertilizantes). Igualmente, se valoran los recursos genéticos (Pps-40) y la provisión de semillas o especies locales adaptadas (Altieri, 2002; Beer et al., 2003; Moonen & Barberi, 2008; Bacon et al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Gutiérrez et al., 2016; Sayago, 2016; Nicholls et al., 2017).

4.2.5 Ciclos causales de la dimensión política

Los ciclos causales de la dimensión política se presentan en la figura 4-5. Los indicadores y SE valorados para cada uno de los principios y criterios de la dimensión política, se relacionan en la tabla 4-5 y en el anexo C.

Tabla 4-5. Indicadores de la dimensión política de valoración de SE

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).							
Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).							
Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados			
Principio 11 – CPol-32							
Instrumentos económicos para reconversión en AS (IER)	\$/año	Autor (2018) basado en (Bockstael et al., 1995; Musacchio & Grant, 2002; Jogo & Hassan, 2010)	R	Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7		
				Regulación hídrica	Rh-8 al 12		
				Abastecimiento de agua	Raa-13		
				Formación de suelo y regulación de nutrientes	Rrs-14 y 15		
				Asimilación de residuos	Rar-22		
				Hábitat	Hab-28 y 29		
Instrumentos económicos para la gestión ambiental	\$/año	Autor (2018) basado en (Nainggolan et al., 2012; Bautista, 2015; Villegas-Palacio et al., 2016)	H	Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb-30		
				Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7		
				Regulación hídrica	Rh-8, 11 y 12		
				Abastecimiento de agua	Raa-13		
				Formación de suelo y regulación de nutrientes	Rrs-14 y 15		
				Asimilación de residuos	Rar-22		
Área con agroecosistemas sostenibles	%	Autor (2018) Basado en (Bockstael et al., 1995; Musacchio & Grant, 2002; Jogo & Hassan, 2010)	R	Hábitat	Hab-28 y 29		
				Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb-30		
				Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 y 7		
				Abastecimiento de agua	Raa-13		
				Regulación hídrica	Rh-8 Rh-12		

146 Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rrs-14 y 15
				Asimilación de residuos Rar-22
				Formación de suelo y regulación de nutrientes Rfs-16
			H	Hábitat Hab-28 y 29
				Mantenimiento de la diversidad biológica Hmdb-30
			P	Alimentos Pa-32
				Materias primas Pmp-36 al 39
				Recursos genéticos Pps-40
			I	Recursos Estéticos Ire-43 y 44
Principio 11 – CPol-33				
Instrumentos económicos para la comercialización de productos de AS (ICP)	\$/año	Autor (2018) basado en (Bockstael et al., 1995; Musacchio & Grant, 2002; Jogo & Hassan, 2010; Bautista, 2015)	P	Alimentos Pa-32 al 34
Inversión en canales de comercialización (ICC)	#	Autor (2018) basado en (Bockstael et al., 1995; Musacchio & Grant, 2002; Jogo & Hassan, 2010; Bautista, 2015)	P	Materias primas Pmp-35 al 39
	\$/año			Recursos genéticos Pps-40
				Recursos medicinales Prm-41
				Recursos ornamentales Pro-42
				Alimentos Pa-32 al 34
			P	Materias primas Pmp-35 al 39
				Recursos genéticos Pps-40
				Recursos medicinales Prm-41
				Recursos ornamentales Pro-42
Principio 11 – CPol-34				
Acceso a crédito (AC)	\$/año	(Peñaloza, (2014))	I	Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46
				Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47
				Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
			R	Asimilación de residuos Rar-22
				Abastecimiento de agua Raa-13
			P	Alimentos Pa-32
				Pa-33
				Pa-34
				Alimentos Pa-32 al 34
Instrumentos económicos para la implementación de tecnologías agroecológicas (ITA)	\$/año	Autor (2018) basado en (Bockstael et al., 1995; Musacchio y Grant, 2002) (Shi & Gill, 2005)	P	Materias primas Pmp-35 al 39
				Recursos genéticos Pps-40
				Recursos medicinales Prm-41
				Recursos ornamentales Pro-42
Principio 11 – CPol-35				
Proyectos de investigación e innovación agroecológica (PIIA)	# proyectos	Autor (2018) basado en (Bockstael et al., 1995; Musacchio & Grant, 2002; Jogo & Hassan, 2010; Bautista, 2015)	I	Recursos estéticos Ire-43 y 44
				Recreación Ir-45
				Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46
				Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 y 48
				Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
Principio 11 – CPol-36				
	#Asistencias/tiempo		I	Recreación Ir-45

Indicador	Unidades	Fuente	FE	SE valorados
Capacitación y sensibilización ambiental (CSA)		Autor (2018) basado en (Shi & Gill, 2005; Bravo-Monroy, Potts & Tzanopoulos, 2016; Bautista, 2015)		Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
Capital humano (CH)	#	Autor (2018) basado en (Portela, 2001)	I	Recursos estéticos Ire-43 y 44 Recreación Ir-45 Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49
Nivel educativo (NE)	#	Autor (2018) basado en (Portela, 2001)	I	Enriquecimiento cultural y artístico Ieca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual Iehe-47 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación Idce-49

Fuente: autor (2018)

La dimensión política se caracteriza porque sus indicadores se encuentran relacionados en los ciclos R13, R15, R18, R19, R24, R25, R26 y R27.

El ciclo R13 (dimensión social) incluye los indicadores participación en asociaciones o agremiaciones, conocimiento y conciencia ecológica y capital humano (indicador político). El indicador capital humano, se define como la suma de la educación, la capacitación y la experiencia que brindan habilidades y conocimientos productivos. La hipótesis plantea que, a mayor participación de la comunidad en las asociaciones, se genera un mayor conocimiento y conciencia ecológica a nivel individual y colectivo, reforzando el capital humano. El conocimiento se adquiere al pertenecer activamente a una organización campesina, mediante capacitaciones, cursos y conocimiento transferido entre sus miembros (Feres & Villatoro, 2007; Sarandón et al., 2008; Giraldo-Betancur & Salinas-Mejía, 2009; Pirachicán-Avila, 2015).

El ciclo R15, involucra los indicadores nivel educativo (indicador político) y población en condición de pobreza. La hipótesis del ciclo R15 plantea que, un mayor nivel educativo reduce la población en condición de pobreza, reforzando el incremento del nivel educativo. Igualmente, el nivel educativo refuerza el indicador calidad de vida (indicador económico) (Portela, 2001; Funes-Monzote et al., 2011; Valdivieso, 2011; Altieri et al., 2012; Rosales-Martínez, Martínez-Dávila & Galicia-Galicia, 2015; Villegas-Palacios et al., 2016).

Los SE valorados en los ciclos R13 y R15 por los indicadores capital humano y nivel educativo (indicadores políticos), se relacionan con funciones de información. Se valoran SE como el enriquecimiento cultural y artístico (Ieca-46), el enriquecimiento histórico y espiritual (Iehe-47, Iehe-48) y el desarrollo cognitivo: ciencia y educación (Idce-49). Mediante la extensión agroecológica adaptada a las condiciones locales, se aporta al nivel educativo y a la formación de capital humano, conservando tradiciones, costumbres, sistemas agrícolas patrimoniales y generando conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Gillison et al., 2004; Feres & Villatoro, 2007; Bacon et al., 2012; Pérez et al., 2015; Bravo-Monroy et al., 2016; Winkler & Nicholas, 2016; Hoffmann, 2017).

En el ciclo R18 (dimensión económica) se encuentra el indicador área con agroecosistemas sostenibles (dimensión política). La hipótesis plantea que, una mayor área de agroecosistemas sostenibles aumenta el número de productos generados (diversificación en la producción),

contribuyendo a la diversificación de ingresos, mejorando la calidad de vida y la aceptabilidad del sistema productivo. Condición que a su vez incrementa las áreas con producción sostenible (Bockstael et al., 1995; Musacchio & Grant, 2002; Sarandón et al., 2008; Jogo & Hassan, 2010; Osorio, Aramburo & Morales, 2011; Valdivieso, 2011). El indicador área con agroecosistemas sostenibles se encuentra influenciado por el indicador instrumentos económicos para la reconversión de sistemas agrícolas en agroecosistemas sostenibles, ya que la disponibilidad de recursos económicos fomenta la reconversión.

En el ciclo R18 se valoran SE derivados de funciones de regulación, como la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rap-7), la regulación hídrica (Rh-8, Rh-11, Rh-12), el abastecimiento de agua (Raa-13), la retención del suelo (Rrs-14, Rrs-15), la formación del suelo (Rfs-16, Rfs-20), la asimilación de residuos (Rar-22), la polinización (Rp-23) y el control biológico (Rcb-24). Además, se valoran SE derivados de funciones de hábitat (Hab-28, Hab-29) y SE de producción de alimentos (Pa-32, Pa-33, Pa-34), materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39), recursos genéticos (Pps-40), recursos medicinales (Prm-41) y recursos ornamentales (Pro-42).

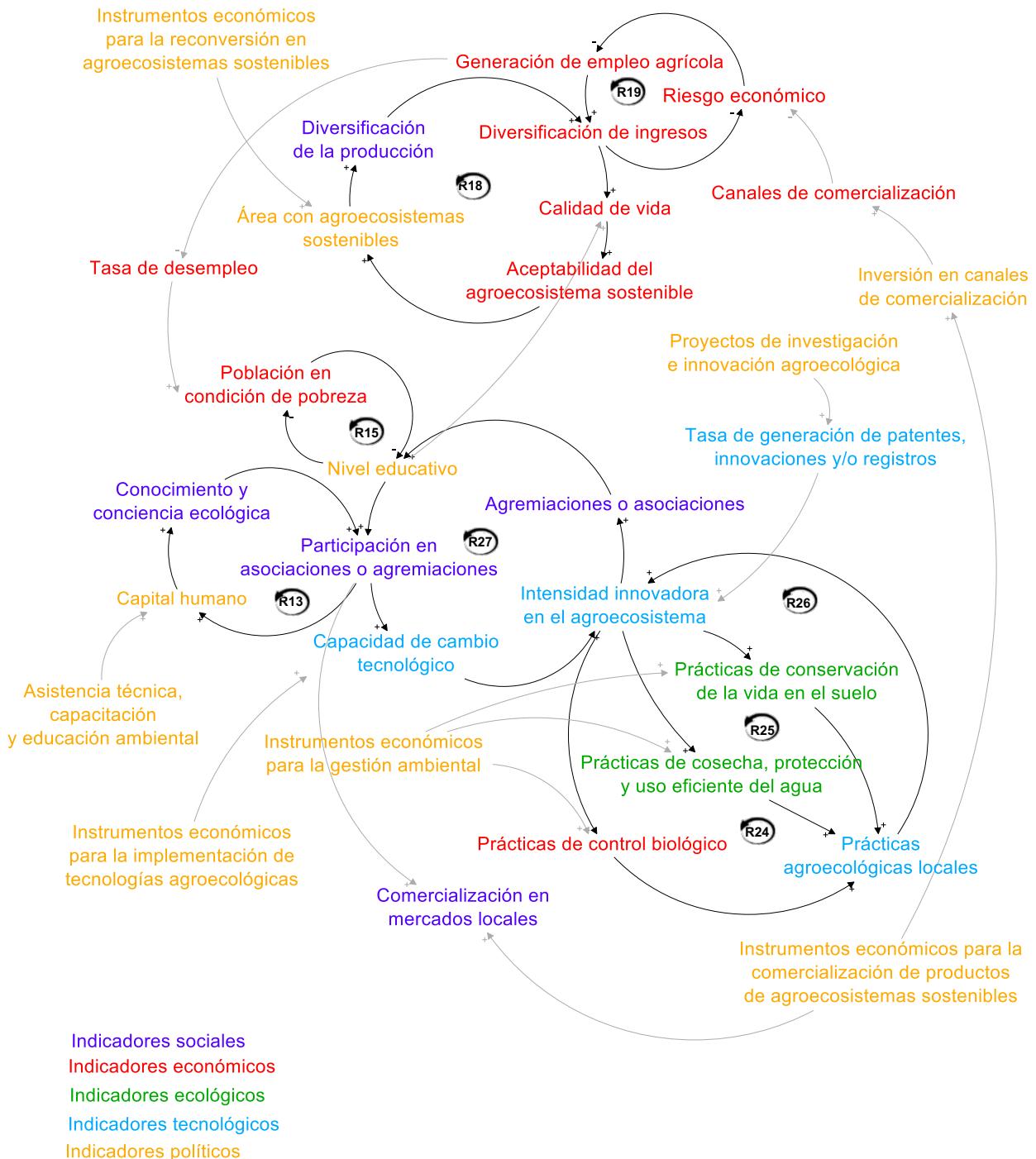
Los instrumentos económicos para promover las prácticas sostenibles valoran SE de regulación y producción. Las inversiones buscan preservar la productividad de las tierras de cultivo en el tiempo y fomentar el uso sostenible de los recursos (agua, suelo, biodiversidad) (Altieri, 2002; Altieri & Nicholls, 2004; Altieri et al., 2012; Bacon et al., 2012; Cerdán et al., 2012; De Souza et al., 2012; Martín & Osorio, 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Nicholls et al., 2015; Pérez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016; Daniels et al., 2017; Nicholls et al., 2017).

El indicador de la dimensión política inversión en canales de comercialización influencia el ciclo R19 de la dimensión económica. La hipótesis plantea que, la inversión en canales de comercialización reduce el riesgo económico, condición que aumenta la generación de empleo agrícola y la diversificación de ingresos de las comunidades campesinas. Los canales de comercialización se constituyen por las formas de comercializar los productos, ya sea venta directa (domicilio, feria ecológica, venta en predio), grupos de consumo (cooperativas productores y consumidores), comercio minorista (tienda), comercio mayorista (supermercado) y el comercio especializado por medio de certificaciones o redes de comercio justo (Sarandón et al., 2008; Aguilar-Ruiz, 2012; Bautista, 2015; Gómez et al., 2015).

Los SE valorados en el ciclo R19 se relacionan con la producción de alimentos (Pa-32, Pa-33, Pa-34), materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39) y recursos genéticos (Pps-40). Los SE valorados involucran los procesos de conversión de energía solar en biomasa, para generar alimentos, forrajes, carne, derivados animales, materias primas, abonos y fertilizantes. Mediante la inversión en canales de comercialización, se incentiva la producción, generando empleo, mejorando los ingresos de las familias campesinas y reduciendo el riesgo económico de las inversiones realizadas (Altieri, 2002; Shi & Gill, 2005; Beer et al., 2003; Moonen & Barberi, 2008; Bacon et al., 2012; Rositano & Ferraro, 2014; Bautista, 2015; Gómez et al., 2015; Gutiérrez et al., 2016; Sayago, 2016; Nicholls et al., 2017).

Los ciclos R24, R25 y R26 de la dimensión tecnológica, se encuentran influenciados por el indicador instrumentos económicos para la gestión ambiental (dimensión política). La hipótesis plantea que, la implementación de instrumentos económicos para la gestión ambiental, entendidos como la sumatoria de los instrumentos disuasivos (multas, tasas retributivas, cobros por uso, impuestos) y los incentivos (pago por generación y/o conservación de SE), generan agroecosistemas con mejores prácticas de control biológico, conservación de suelos, cosecha, protección y uso eficiente de agua (Nicholls, 2008; Sarandón et al., 2008; Cardona & Ochoa, 2013; Casimiro-Rodríguez, 2016).

Figura 4-5. Ciclos causales de la dimensión política de valoración de SE



Fuente: autor (2018)

Los SE valorados en los ciclos R24, R25 y R26, se relacionan con la regulación del microclima (Rc4, Rc-5), la prevención de alteraciones (Rpa-6, Rpa-7), la regulación hídrica (Rh-9, Rh-10, Rh-11) el abastecimiento de agua (Raa-13), la retención del suelo (Rrs-14, Rrs-15), la formación del suelo (Rfs-16, Rfs-17, Rfs-18, Rfs-19, Rfs-20), la asimilación de residuos (Rar-21, Rar-22), la polinización (Rp-23) y el control biológico (Rcb-24, Rcb-25, Rcb-26, Rcb-27). Además, se valoran

SE de hábitat (Hab-28, Hab-29), mantenimiento de la diversidad biológica (Hmdb-30, Hmdb-31) y producción de materias primas (Pmp-35, Pmp-36, Pmp-37, Pmp-38, Pmp-39). Los instrumentos económicos para la gestión ambiental (disuasivos o incentivos) aumentan la generación e implementación de prácticas agroecológicas locales, mejoran la intensidad innovadora del agroecosistema y conservan los SE valorados (Gillison et al., 2004; Khalajabadi, 2008; Moonen & Barberi, 2008; Abaunza et al., 2011; Altieri et al., 2012; De Souza et al., 2012; Martín & Osorio, 2012; Gutiérrez et al., 2016; Daniels et al., 2017; Nicholls et al., 2017).

4.3 Paso 3 - modelo general de valoración - ciclo causal integrado

En la figura 4-6 se presenta el modelo general de valoración de SE en agroecosistemas sostenibles. El modelo integra los ciclos causales de las dimensiones ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política. La valoración (importancia) de las funciones y SE que se desean incorporar y mantener en el agroecosistema, se identifica mediante los indicadores involucrados en las dimensiones, principios y criterios.

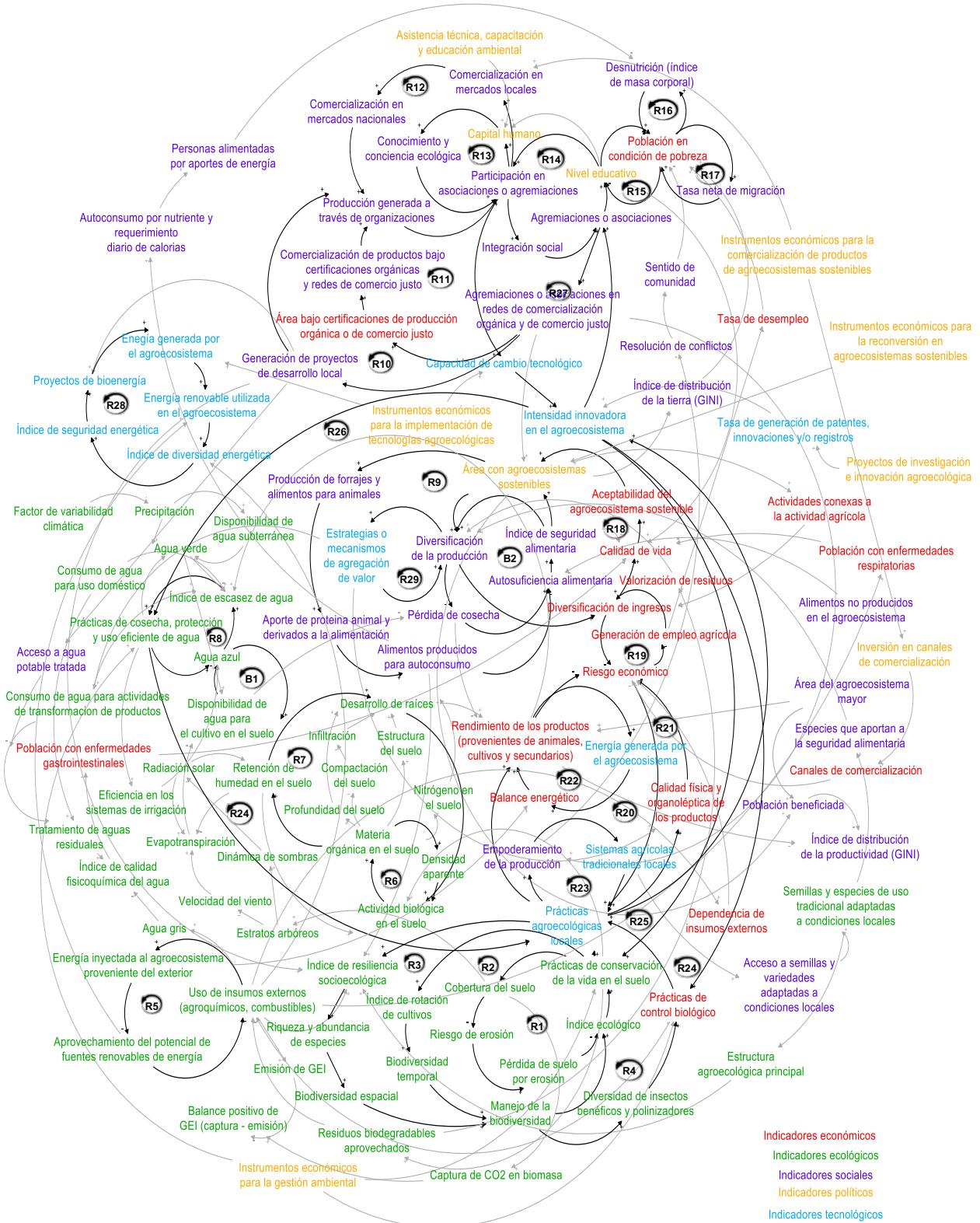
El modelo general permite un acercamiento a la definición de agroecosistema sostenible, planteada en el capítulo 1 (numeral 1.1.1.2): “*el agroecosistema sostenible es un ecosistema modificado para la producción de bienes y servicios que genera bienestar a las comunidades, el cual es analizado como un sistema complejo que incluye variables y relaciones ecológicas, socioculturales, económicas, tecnológicas y políticas. Se diseña y maneja para imitar la estructura y función de los ecosistemas locales, involucrando el conocimiento tradicional y científico, de manera que las interacciones ecológicas y los sinergismos entre sus componentes, generen funciones y SE que garanticen en el tiempo la productividad y la protección del sistema a variables externas*” (Autor, 2018) basado en Altieri y Nicholls (2000); Altieri (2002); Gliessman (2002); Altieri y Nicholls (2007); León (2009); Altieri et al. (2012); Altieri (2013); Sarandón y Flores (2014).

En este sentido, la figura 4-6 visualiza el agroecosistema como un sistema complejo, se identifican los ciclos causales (bucles) que pueden ser positivos (ciclo causal reforzado) o negativos (ciclo causal balanceado). Igualmente, el modelo general permite identificar las relaciones entre los indicadores, las cuales pueden tener una influencia directa (+) o inversa (-) con los elementos relacionados.

El modelo general permite visualizar la implementación de los macroaspectos de sostenibilidad (biodiversidad, estrategias agroecológicas, reducción de efectos ambientales, incorporación de conocimientos y prácticas locales) (Gliessman et al., 1998; Reijntjes et al., 1992, Altieri, 2002; Altieri & Nicholls, 2007; Altieri et al., 2012). El agroecosistema como sistema complejo, integra las cinco dimensiones de valoración, ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política. La dimensión ecológica a través de la biodiversidad, se constituye en el pilar fundamental para generar efectos positivos, sinergias y comportamientos emergentes que potencian las dimensiones consideradas.

El modelo general interpreta como el conocimiento científico y local, permite el diseño y manejo de los agroecosistemas ricos en biodiversidad, en los cuales las interrelaciones y sinergismos promueven funciones y SE. Los agroecosistemas que valoran los SE logran una mayor independencia de las condiciones externas, al generar atributos como productividad, estabilidad, viabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autosuficiencia (López-Ridaura et al., 2002; Astier et al., 2008).

Figura 4-6. Modelo general de valoración – ciclo causal integrado



Fuente: autor (2018)

Por otra parte, el modelo general de valoración identifica la forma en que los ciclos causales se componen de indicadores de diferentes dimensiones de valoración. Se observa como los principios y criterios pueden ser interdimensionales, resaltando la complejidad del sistema. Igualmente, un SE puede ser valorado por indicadores de diferentes dimensiones, potenciando su importancia dentro del agroecosistema.

En el modelo general, se observa como los indicadores de la dimensión ecológica se encuentran relacionados con variables socioculturales, potenciando aspectos como la producción de alimentos para autoconsumo, la generación de proyectos de desarrollo local, el acceso a semillas adaptadas a condiciones locales y la reducción de pérdidas de cosechas. Igualmente, los indicadores de la dimensión ecológica se relacionan con indicadores económicos (riesgo económico, rendimiento de los productos), tecnológicos (estrategias o mecanismos de agregación de valor, prácticas agroecológicas locales) y políticos (instrumentos para la gestión ambiental).

La dimensión sociocultural se relaciona con indicadores de la dimensión económica, como son: la población en condición de pobreza, el rendimiento de los productos, el riesgo económico y la calidad de vida. En la dimensión sociocultural los indicadores autosuficiencia alimentaria y seguridad alimentaria, son influenciados por la inclusión de la biodiversidad (indicador ecológico) y las prácticas agroecológicas locales (indicador tecnológico).

Los indicadores de la dimensión económica presentan mayor relación con los indicadores ecológicos. Los indicadores que integran el ciclo ecológico R5: uso de insumos externos, energía injectada al agroecosistema proveniente del exterior y aprovechamiento del potencial de fuentes renovables de energía, influencian los indicadores de la dimensión económica, balance energético y rendimiento de los productos.

En la dimensión tecnológica, se observa una mayor relación con indicadores ecológicos como las prácticas de conservación de suelos y las prácticas de cosecha, protección y uso eficiente de agua. Los indicadores tecnológicos se relacionan con indicadores de la dimensión económica como la diversificación de ingresos (ciclo R18).

En el caso de la dimensión política, los indicadores presentan un comportamiento como variables externas, es decir, se encuentran fuera de los ciclos encontrados. Sin embargo, presentan conexión con indicadores como diversificación de la producción (dimensión sociocultural), canales de comercialización (indicador económico), prácticas agroecológicas locales (indicador sociocultural), prácticas de conservación de suelos y prácticas de cosecha, protección y uso eficiente de agua (indicadores ecológicos). La dinámica de sistemas permite realizar análisis de sensibilidad, para determinar la respuesta del modelo a las variaciones en los indicadores externos.

5. Simulación del modelo en el agroecosistema tipo

La simulación del modelo se realiza mediante la implementación del software Stella® (versión 1.6) el cual permite incluir la información (series de tiempo) para el cálculo de los indicadores involucrados en las hipótesis dinámicas. Datos identificados en los documentos analizados para la definición y articulación de las bases teóricas y conceptuales (Capítulo 1), los aportes metodológicos desde la economía ecológica a la valoración de SE en agroecosistemas (Capítulo 2) y los documentos específicos sobre el agroecosistema tipo seleccionado (numeral 5.1.1). En este capítulo se desarrollan los pasos cuarto, quinto, sexto y séptimo de la metodología de valoración de SE en dinámica de sistemas establecida en el capítulo tres.

5.1 Paso 4 - establecimiento del agroecosistema tipo para valoración de SE

5.1.1 Identificación de agroecosistemas sostenibles

En la definición y articulación de las bases teóricas, conceptuales y los aportes metodológicos desde la economía ecológica a la valoración de SE en agroecosistemas, se incluyeron en total de 378 documentos, de los cuales 171 aportaron a la definición de dimensiones, principios, criterios e indicadores y 63 documentos se incluyeron en el análisis de los aportes metodológicos.

En los documentos referenciados se identifican tres sistemas de producción que corresponden con la definición propuesta de agroecosistemas sostenible. Los sistemas han sido trabajados por la comunidad científica desde una o varias dimensiones de valoración e incluyen información relacionada con los indicadores que conforman los ciclos causales parciales (hipótesis dinámicas) de las dimensiones ecológica, sociocultural, económica, tecnológica y política. Los agroecosistemas identificados son: sistema de producción de café con semisombra, sistema de producción de café con sombra y sistema de producción de cacao tradicional.

➤ Sistema de producción de café con semisombra

El sistema utiliza el componente arbóreo como regulador de luz, cuenta con densidades entre 20 y 50 árboles por hectárea y la utilización de especies arbustivas semipermanentes (plátano, banano) entre 300 y 750 individuos por hectárea. Generalmente se utilizan especies como guamo, nogal, chachafruto (Arcila, Farafan, Moreno, Salazar & Hincapié, 2007).

➤ Sistema de producción de café bajo sombra

El sistema de producción de café bajo sombra está caracterizado por el empleo de especies arbóreas permanentes con densidades mayores a 50 árboles por hectárea. Se incluyen también los sistemas con regulación de luz a partir de especies arbustivas con densidades iguales o superiores a 750 árboles por hectárea, con arreglos espaciales uniformes (Arcila et al., 2007). Por medio de este sistema productivo se regula la incidencia de luz, diversificando las especies y los productos en el agroecosistema. Estos sistemas se caracterizan por incluir una alta biodiversidad, generar servicios ecosistémicos, reducir costos de producción y minimizar los efectos ambientales mediante la inclusión de prácticas agroecológicas. (Arcila et al., 2007; Plaza, 2013; Espinoza-Núñez, 2017).

➤ Sistema de producción de cacao tradicional

Son sistemas de cacao como producto principal, en asocio con yuca, aguacate, achiote, sandía, tomate, frijol, plátano, coco, plantas medicinales y árboles en un mismo predio, en densidades de 600 a 700 árboles/hectárea. El sistema utiliza mano de obra para las labores del cultivo y material genético de origen local, el producto principal y los productos secundarios son comercializados por medio de organizaciones (Espinosa-Álvarez & Ríos-Osorio, 2016).

5.1.2 Matriz de calificación

La selección del agroecosistema tipo (AT) se realiza mediante la matriz de selección (Ver tabla 5-1). Se asigna un puntaje Alto (3), Medio (2), Bajo (1) y Nulo (0), según la relación con las características descritas en el método para la definición del agroecosistema tipo (numeral 3.4). A continuación, se realiza la calificación:

Tabla 5-1. Matriz de selección del agroecosistema tipo

Características	Sistema de producción de café bajo sombra	Sistema de producción de café con semisombra	Sistema de producción de cacao tradicional	Puntaje
Diseño y manejo desde una visión sistémica compleja	3	2	3	
Biodiversidad	3	2	3	
Implementación de macroaspectos de sostenibilidad	Estrategias agroecológicas	3	2	2
	Reducción de efectos ambientales	3	2	3
	Tecnología local	3	3	3
	Cultura	3	3	3
	Acceso, derecho y redistribución	3	2	3
	Reducción de costos	3	3	3
Aportante al bienestar de las comunidades	Producción de alimentos y seguridad alimentaria	3	2	3
	Conservación de recursos naturales y reducción de efectos ambientales negativos	3	2	3
	Reducción de la pobreza	2	2	3
	Inclusión social	2	2	3
Existencia y acceso a la información que permite el cálculo de los indicadores		3	2	1
Certificaciones de producto		3	3	1
Certificaciones de protección de biodiversidad		3	1	1
Puntaje total	43	33	38	

Fuente: autor (2018)

Realizada la calificación, el sistema de producción de café bajo sombra obtuvo la mayor puntuación con 43 puntos. El agroecosistema tipo seleccionado para la simulación del modelo general es el sistema de café bajo sombra, la principal característica de la selección, es la existencia y acceso a la información relacionada con los indicadores y los ciclos causales parciales de las dimensiones de valoración de SE en AS.

El sistema de producción de café bajo sombra en Colombia se caracteriza por la reducción en el uso de agroquímicos, combustibles fósiles y efectos ambientales negativos. Es un agroecosistema de importancia en la generación y conservación de SE, como la protección de la biodiversidad, el mantenimiento de la conectividad del paisaje, la regulación y conservación de agua, la captura y almacenamiento de CO₂, la polinización, la formación de suelo y el ciclaje de nutrientes.

(Bustamante et al., 2004; Farfan & Mestre, 2004; Khalajabadi, 2008; Aguilar-Ruiz, 2012; Moraga et al., 2012; Pérez-Nieto et al., 2012; Segura & Andrade, 2012; Heredia & Maribel, 2013; Cepeda-Valencia et al., 2014; Vásquez-Vela, 2014; Machado et al., 2015; Figueroa-Lucero, 2016; Lucero, 2016; Andrade & Segura, 2016; Vargas & Osorio, 2016; Castro, 2017).

El sistema productivo puede ser objeto de certificaciones de conservación de la biodiversidad (Bird friendly) y comercio justo. Las certificaciones de conservación de la biodiversidad tienen como requisito la certificación previa de producción orgánica, evaluando además aspectos como la cobertura de sombra, la altura de los árboles, los estratos predominantes y la diversidad florística (Gómez-Montoya, 2015). Además, las certificaciones garantizan la valorización de SE para minimizar el consumo de recursos no renovables, con énfasis en fertilizantes, plaguicidas sintéticos y combustibles.

Las certificaciones de comercio justo pretenden mejorar el acceso a mercados y las condiciones comerciales para los pequeños productores, garantizando un precio mínimo del producto exportado. La certificación de comercio justo puede ser solicitada por productores organizados en cooperativas y asociaciones, la certificación garantiza un precio mínimo del producto y mejora las condiciones de calidad de vida de los participantes en las organizaciones certificadas (Segura & Andrade, 2012).

En Colombia, el agroecosistema tipo seleccionado “café bajo sombra”, hace parte del denominado paisaje cultural cafetero (PCC), reconocido e inscrito por el comité de patrimonio mundial de la Organización de las Naciones Unidas, en la lista de patrimonio mundial el 25 de junio de 2011. El PCC está conformado por 47 municipios y 411 veredas de los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca. Esta región se caracteriza por la presencia de bosques nativos y corredores biológicos, hábitats indispensables para la conservación de la biodiversidad y los SE (Guzmán, 2015).

Para el departamento de Caldas, la federación reporta la presencia de más de 41.000 hectáreas en producción de cafés especiales en el año 2017. Cafés valorados por los consumidores por sus atributos consistentes, verificables y sostenibles, por los cuales están dispuestos a pagar precios superiores (certificaciones de producto y protección de la biodiversidad). Las características están definidas por el origen del café, por su producción en armonía con el medio ambiente, denominada categoría sostenible y por su compromiso con el desarrollo social de las comunidades o categoría social (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2018).

5.2 Paso 5 - formalización del modelo

Para el agroecosistema tipo seleccionado (café bajo sombra) se establecen los supuestos de modelación que permiten seleccionar la información a utilizar. Posteriormente se describen los límites del modelo, constituidos por los indicadores. Es decir, las variables endógenas (internas) y exógenas (externas) que hacen parte de los cálculos matemáticos. Los indicadores están relacionados con los SE valorados en cada dimensión, las relaciones entre los diversos indicadores y sus ecuaciones matemáticas conforman el modelo formal de valoración.

5.2.1 Supuestos del modelo

Una vez definido el agroecosistema tipo (café bajo sombra) se establecen los supuestos de modelación (tabla 5-2). Los supuestos permiten identificar las características del agroecosistema

a modelar, definir la búsqueda de datos necesarios para la implementación de los indicadores en el modelo formal y calcular las variables involucradas.

Tabla 5-2. Supuestos de modelación del agroecosistema tipo

Agroecosistema tipo:	café bajo sombra (<i>Coffea arabica L.</i>) con sombrío de guamo (<i>Inga sp.</i>) como especie arbórea principal
Área:	5 hectáreas de café, 1 hectárea para vivienda y cultivos para autoconsumo (ornamentales, medicinales, otras)
Densidad del cafetal:	1,5 * 1,5 m
Número de plantas por hectárea:	4444 plantas de café/ha
Renovación:	10% a partir el 4 año
Árboles de sombrío:	guamo (<i>Inga sp.</i>) como especie arbórea principal
Densidad del sombrío:	12*12 m
Número de árboles por hectárea:	70 árboles/ha
Región:	paisaje cultural cafetero – Colombia
Integrantes del núcleo familiar:	5 personas
Características generales:	<ul style="list-style-type: none"> • La modelación inicia en el año 0 (establecimiento de cafetos y árboles) hasta el año 10. • El área destinada a cafetal y autoconsumo se mantiene estable durante el periodo de modelación (10 años). • Se considera la cosecha promedio anual (cosecha principal más recolecciones secundarias). • Se consideran estables las propiedades del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para la extensión del cafetal. • Se establecen los valores de fertilización recomendados (N, P, K, Mg, S). • Estandarización de valores por hectárea. • Para los Indicadores adimensionales, se estandarizaron valores de calificación de 0 a 4, siendo 4 el valor de mejor desempeño del indicador evaluado.

Fuente: autor (2018)

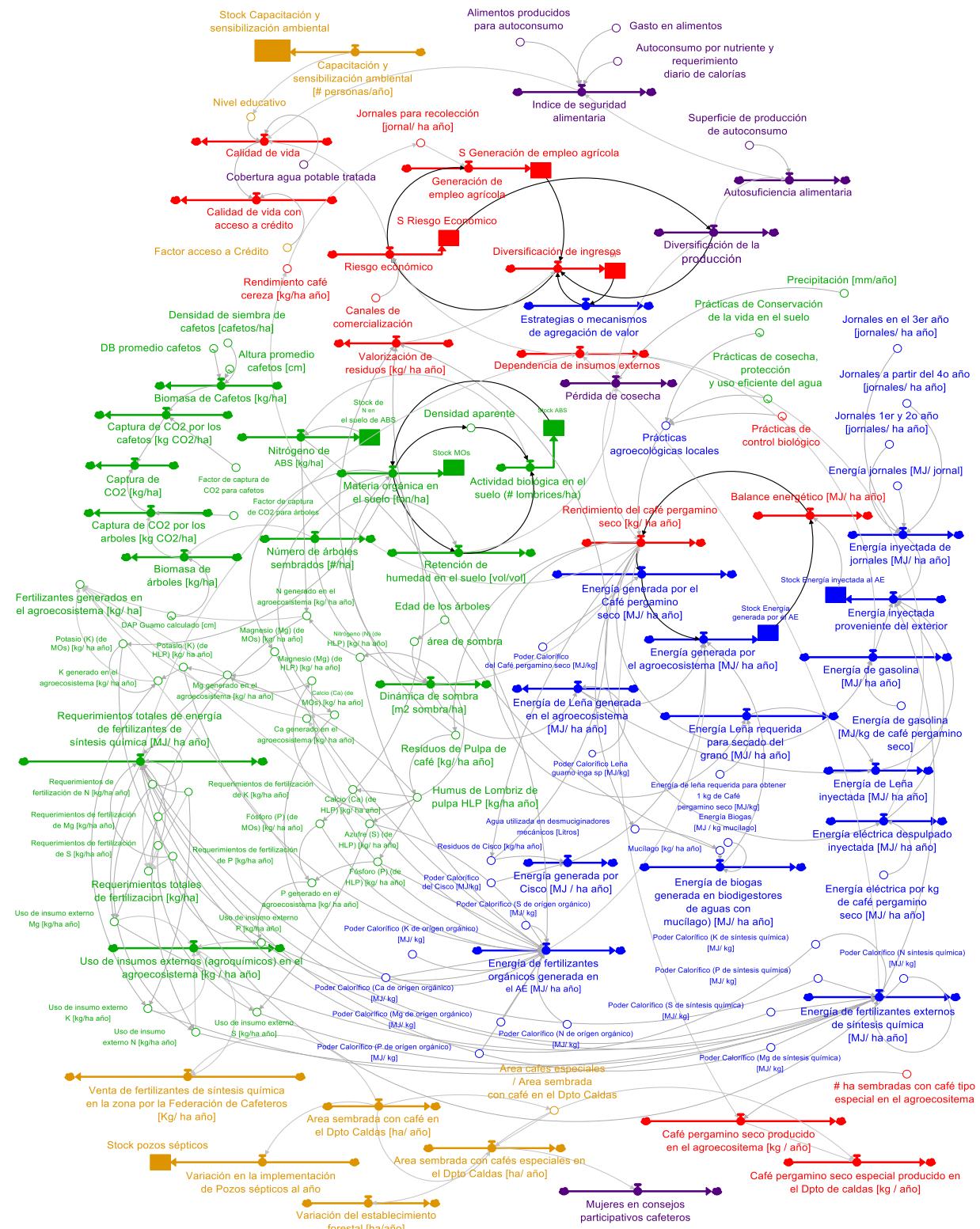
Los supuestos de modelación del agroecosistema tipo, descritos en la tabla 5-2, se basan en informes de gestión y datos históricos, reportados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia entre los años 2005 y 2017.

Se define el agroecosistema tipo como área de pequeño a mediano productor, el cual trabaja con la cooperación de miembros de su familia a tiempo parcial o completo en áreas de hasta 5 hectáreas (Parada-Sanabria, 2017). El área dedicada a productos de autoconsumo se establece en una (1) ha, con un promedio de 11 productos diferentes, incluyendo derivados animales (carnes, lácteos y huevos) (Aristizábal & Duque, 2009).

La densidad de plantas de café y árboles de sombrío por hectárea, se establecen según los lineamientos reportados por Cardona y Sadeghian (2013). Los rangos altitudinales del agroecosistema tipo se encuentran entre 1200 m.s.n.m y 1800 m.s.n.m. en el denominado Paisaje Cultural Cafetero (PCC), conformado por los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca (Guzmán, 2015). Finalmente, las características del núcleo familiar se establecen en 5 miembros activos con dedicación a las actividades productivas del agroecosistema (finca) según las investigaciones de López-Cardona (2013).

5.2.2 Ecuaciones del modelo

Figura 5-1. Modelo formal de valoración



Fuente: autor (2018)

La selección de los indicadores se deriva de la existencia y acceso a la información correspondiente para su cálculo y su pertinencia para explicar adecuadamente las hipótesis causales planteadas en el capítulo 4. Los indicadores de cada dimensión permiten valorar una serie de servicios ecosistémicos, para el caso de aplicación en el agroecosistema tipo involucran un total de 49 servicios ecosistémicos clasificados en la tabla A-3 (anexo A).

Luego de seleccionados los indicadores, se clasifican en endógenos y exógenos. Los indicadores endógenos son influenciados directamente por otros indicadores o son calculados por el modelo, los indicadores exógenos son los que actúan como causa, influencian otros indicadores, o se calculan con datos independientes del sistema (Sterman, 2002). En la construcción del modelo formal se relacionaron un total de 28 indicadores, de los cuales 26 son endógenos y 2 son exógenos. En cuanto a la relación de los indicadores con las dimensiones del valor, 9 indicadores son de la dimensión ecológica, 5 indicadores de la dimensión sociocultural, 3 indicadores de la dimensión tecnológica, 7 indicadores de la dimensión económica y 4 indicadores de la dimensión política. El modelo formal construido con los indicadores involucrados para cada dimensión se observa en la figura 5-1.

5.2.2.1 Dimensión ecológica

En la modelación se incluyeron 9 indicadores, las ecuaciones para el cálculo de los indicadores y los SE valorados por indicador se observan en la tabla 5-3, los cálculos de los indicadores y la validación estadística se especifican en el anexo D. A continuación, se describen los indicadores de la dimensión ecológica.

El indicador dinámica media de sombra (DS) es calculado en la modelación por medio de la ecuación ajustada propuesta por Andrade y Segura (2016). La ecuación relaciona el número de árboles por hectárea y la edad de los árboles en una plantación de café bajo sombra, para obtener el número de m^2 de sombra/ha. En la modelación realizada, el aumento en el área de sombra/ha en el agroecosistema, valora la provisión de SE como: control de humedad, radiación y vientos (Rc-4), generación de condiciones microclimáticas favorables para especies animales y vegetales dentro del agroecosistema (Rc-5), conservación de la humedad del suelo (Rh-10), provisión de cobertura para conservación de suelo y agua (Rfs-18), generación de condiciones para refugio, alimentación y sitio de reproducción (Hab-29), existencia de una variedad de especies que interactúan dentro y fuera del agroecosistema (Hmdb-31).

Las prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA) constituyen un indicador adimensional calificado según las estrategias de almacenamiento (E1), cosecha (E2), protección y uso eficiente de agua implementadas en el agroecosistema (Cardona & Ochoa, 2013). El indicador puede obtener puntajes de mínimo 0 y máximo 4, reflejando el tipo de estrategias implementadas. Un mayor puntaje obtenido por el indicador PCA, se relaciona con el aumento en la provisión y la valoración de SE como: aumento de la resiliencia del agroecosistema (Rpa-6), drenaje y riego natural (Rh-9), conservación de la humedad del suelo (Rh-10) y provisión de cobertura para conservación de suelo y agua (Rfs-18).

El indicador materia orgánica en el suelo (MOs) mide la cantidad de materia orgánica (ton/ha-año) generada en el agroecosistema, según el número de árboles y la edad de los árboles. El cálculo del indicador se basa en los datos reportados por Cardona y Sadeghian (2013). Al realizar la modelación, derivado de las relaciones identificadas en el ciclo causal parcial (figura 4-1), la dinámica del indicador MOs en el sistema (ecuación 2), es influenciada por las variables dinámica media de sombra (DS) y actividad biológica en el suelo (Abs). La DS incluye el número de árboles plantados y la Abs calcula el # lombrices / m^2 . Los árboles aportan materia orgánica en forma de

hojarasca, luego la actividad biológica determina la descomposición de esta materia orgánica y su incorporación a los ciclos de nutrientes. La dinámica del indicador MOs en el modelo, valora principalmente la provisión de SE como: almacenamiento de materia orgánica y biomasa al suelo (Rg-2), conservación del suelo productivo (Rh-11), promoción de la biología del suelo por adición de materia orgánica y excreciones radiculares (Rfs-19) y mantenimiento de las condiciones ideales para especies animales o vegetales dentro del agroecosistema (Hab-28).

La densidad aparente (DA) es una propiedad del suelo influenciada por las prácticas de manejo de suelos y aguas, es la relación de la masa del suelo por unidad de volumen. Una baja densidad aparente indica suelos porosos, bien aireados y con buen drenaje (Salamanca & Sadeghian, 2005). La dinámica del indicador se modela mediante la ecuación reportada por Salamanca y Sadeghian (2005) para la zona cafetera colombiana (ecuación 3). La DA está influenciada por la materia orgánica en el suelo (MOs), a mayor MOs se reducen los valores de DA (g/cm^3). El indicador DA en el modelo valora la provisión de SE como: conservación de la humedad del suelo (Rh-10) y conservación del suelo productivo (Rh-11).

La retención de humedad en el suelo (RHs) determina la relación entre el volumen de agua y el volumen total o aparente del suelo seco. El cálculo del indicador en la modelación se realiza mediante los datos reportados por Cardona y Sadeghian (2006). Las relaciones identificadas en el ciclo causal parcial (figura 4-1) determinan el comportamiento dinámico del indicador RHs en la modelación. El indicador es influenciado por las variables materia orgánica en el suelo (MOs) y número de árboles por hectárea (NA) (ecuación 4). A mayor NA, aumenta la cantidad de MOs, mejorando la RHs. El indicador RHs en la modelación valora la provisión de SE como: conservación de la humedad del suelo (Rh-10) y conservación del suelo productivo (Rh-11).

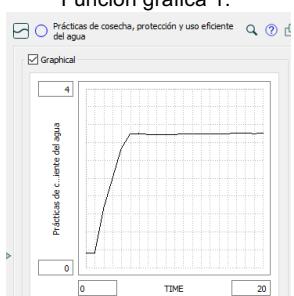
El indicador actividad biológica en el suelo (Abs) determina el número de lombrices/ m^2 hasta 10 cm de profundidad en el agroecosistema. Los datos para el cálculo del indicador se basan en los reportes de Vásquez-Vela (2014) y Montagnini et al. (2015). El comportamiento dinámico del indicador en el modelo es influenciado por la retención de humedad en el suelo (RHs) y la densidad aparente (DA) (ecuación 5). Una mayor RHs y una menor DA, mejoran las condiciones del indicador actividad biológica en el suelo. El indicador Abs, valora la provisión de SE como: incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21), mantenimiento de las condiciones ideales para especies animales o vegetales dentro del agroecosistema (Hab-28), generación de condiciones para refugio, alimentación y sitio de reproducción (Hab-29) y existencia de una variedad de especies que interactúan dentro y fuera del agroecosistema (Hmdb-31).

El indicador aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S) determina el aporte en Kg/ha-año de los elementos nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg) y azufre (S). Elementos generados en el agroecosistema por descomposición de la materia orgánica aportada por el componente arbóreo y por la adición de humus de lombriz producido a partir de pulpa de café. Los datos para el cálculo del indicador se realizan según Alemán y Reyes (2017), los aportes de N, P, K, Mg y S por kilogramo de humus de lombriz se calculan según Blandón-Castaño, Dávila-Arias y Rodríguez-Valencia (1999). El comportamiento dinámico del indicador está relacionado con las variables materia orgánica en el suelo (MOs) y humus de lombriz producido en el agroecosistema (HLP). El indicador aporte de elementos mayores y menores al suelo, valora la provisión de SE como: incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21), control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos (Rar-22) y producción de fertilizantes (Pmp-39).

El indicador prácticas de conservación de la vida en el suelo (PCVS) es una calificación sobre el tipo de prácticas implementadas en el manejo de la cobertura vegetal y la diversificación en el agroecosistema. El indicador es planteado por Sarandón et al. (2008) y en la modelación se califica según los supuestos y condiciones del agroecosistema tipo. El indicador obtiene una calificación de 0 hasta 4 dependiendo de las prácticas implementadas (función gráfica 2 en tabla 5-3). Por medio del indicador PCVS se valoran principalmente SE como: conservación de la humedad del suelo (Rh-10), conservación del suelo productivo (Rh-11), prevención de daños por erosión (Rrs-15) y provisión de cobertura para conservación de suelo y agua (Rfs-18).

El indicador captura de CO₂ (CDC) determina los Kg de CO₂-eq/ha capturados en la biomasa de árboles y cafetos. Las ecuaciones para determinar la captura de CO₂ son propuestas por Moraga et al. (2012) (ecuación 11). Por medio del indicador CDC se valoran principalmente SE como: almacenamiento de materia orgánica y biomasa al suelo (Rg-2) y almacenamiento de carbono en especies arbóreas del agroecosistema (Rg-3).

Tabla 5-3. Indicadores y SE valorados para la dimensión ecológica

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).					
Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).					
		Dimensión ecológica			
Unidades	Fuente	Ecuación/Valor		FE	SE valorados
		P3-CEcol-6-Indicador endógeno: dinámica media de sombra (DS)			
<i>m² sombra</i> ha	(Andrade & Segura, 2016)	Ecuación 1: DS = AS × NA Donde: AS= área de sombra NA= número de árboles por hectárea	R	Regulación del clima Prevención de alteraciones (resiliencia) Regulación hídrica Formación del suelo y regulación de nutrientes Polinización de los cultivos	Rc-4 Rc-5 Rpa-6 Rpa-7 Rh-9 Rh-10 Rfs-18 Rfs-19 Rp-23
		P3-CEcol-7-Indicador endógeno: prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA)			
#	Autor (2018) Basado en (Cardona & Ochoa, 2013)	Función gráfica 1: 	R	Prevención de alteraciones (resiliencia) Regulación hídrica Abastecimiento de agua Formación del suelo y regulación de nutrientes Polinización de los cultivos	Rpa-6 Rpa-7 Rh-9 Rh-10 Raa-13 Rfs-18 Rfs-19 Rp-23 Habitat Habitat
		P3-CEcol-8-Indicador endógeno: materia orgánica en el suelo (MOs)			
<i>ton</i> ha año	(Altieri & Nicholls, 2002; Cardona & Sadeghian, 2013).	Ecuación 2: IF TIME < 14 THEN 0,00202 × DS + 2,855E - 07 × Stock Abs ELSE RANDOM (17,1; 18,2) Donde: DS= dinámica media de sombra	R	Regulación de gases Regulación hídrica Formación del suelo y regulación de nutrientes	Rg-1 Rg-2 Rh-10 Rh-11 Rfs-17 Rfs-18

Dimensión ecológica				
Unidades	Fuente	Ecuación/Valor	FE	SE valorados
		Abs= actividad biológica en el suelo		Rfs-19 Rfs-20
			Polinización de los cultivos	Rp-23
			Hábitat	Hab-28 Hab-29
			H Mantenimiento de la biodiversidad biológica	Hmdb-31
		P3-CEcol-8-Indicador endógeno: densidad aparente (DA)		
		Ecuación 3: DA = 1,77 – 0,14 MO + 0,006		
g / cm ³	(Salamanca & Sadeghian, 2005)	MO ² – 0,00008 MO ³ (R ² =0,69)	R	Regulación hídrica
		Donde: MOs= materia orgánica en el suelo		Rh-10 Rh-11
		P3-CEcol-8-Indicador endógeno: retención de humedad en el suelo (RHs)		
%	(Jaramillo-Robledo & Cháves-Córdoba, 1999; Cardona & Sadeghian, 2006)	Ecuación 4: Rh _s = 0,0698 + 0,00034(MO) + 0,00697(NA)		Regulación hídrica
		Donde: MOs= materia orgánica en el suelo NA= número de áboles por hectárea		Rh-10 Rh-11
		P3-CEcol-8-Indicador endógeno: actividad biológica en el suelo (Abs)		
# lombrices ha año	(Vásquez-Vela, 2014; Montagnini et al., 2015)	Ecuación 5: Abs = (766,986 × RHs – 113,077 × DA) × 10000	R	Regulación hídrica Formación de suelo y regulación de nutrientes Asimilación de residuos Polinización de los cultivos
		Donde: RHs= retención de humedad en el suelo DA= densidad aparente		Rhs-17 Rfs-20 Rar-21 Rp-23 Hábitat Hab-28 Hab-29
			H	Mantenimiento de la biodiversidad biológica
		P3-CEcol-8-Indicador endógeno: aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S)		Hmdb-31
		Ecuación 6: Ngen= (N) MOs + (N) HLP		
		Donde: Ngen= nitrógeno generado en el agroecosistema MOs= materia orgánica en el suelo		
		N= nitrógeno HLP= humus de lombriz producido en el agroecosistema		Retención de suelo
		Ecuación 7: Pgen= (P) HLP + (P) MOs		Rrs-14 Rrs-15
		Donde: Pgen= fósforo generado en el agroecosistema P= fósforo HLP= humus de lombriz producido en el agroecosistema		
		MOs= materia orgánica en el suelo	R	Formación de suelo y regulación de nutrientes
		Ecuación 8: Kgen= (K) HLP + (K) MOs		Rfs-19
Kg ha año	(Portela & Rademacher, 2001)	Donde: Kgen= potasio generado en el agroecosistema K= potasio HLP= humus de lombriz producido en el agroecosistema MOs= materia orgánica en el suelo		
		Ecuación 9: Mggen= (Mg) HLP + (Mg) MOs		
		Donde: Mggen= magnesio generado en el agroecosistema Mg= magnesio HLP= humus de lombriz producido en el agroecosistema MOs= materia orgánica en el suelo		
		Ecuación 10: Sgen= 0,004 × HLP	P	Asimilación de residuos
		Donde: Sgen= azufre generado en el agroecosistema S= azufre HLP= humus de lombriz producido en el agroecosistema		Rar-21 Rar-22
		P3-CEcol-8-Indicador endógeno: prácticas de Conservación de la vida en el suelo (PCVS)		Pmp-39

Unidades	Fuente	Dimensión ecológica		
		Ecuación/Valor	FE	SE valorados
#	(Sarandón et al., 2008)	<p>Función gráfica 2:</p> <p>PCVS=(A1+A2+A3) /3</p> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> A1= manejo de la cobertura vegetal A2= rotaciones de cultivos A3= diversificación de cultivos 	R	Regulación hídrica Rh-10 Rh-11 Retención del suelo Rrs-14 Rrs-15 Formación del suelo y regulación de nutrientes Rfs-18 Rfs-19
				Asimilación de residuos Rar-22
Kg CO ₂ -eq / ha	(Moraga et al., 2012)	<p>P3-CEcol-9-Indicador endógeno: captura de CO₂ (CDC)</p> <p>Ecuación 11:</p> <p>CDC= (CDCarb + CDCcaf)</p> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> CDCarb= captura de CO₂ árboles CDCcaf= captura de CO₂ cafetos 	R	Regulación de gases (mitigación del cambio climático) Rg-2 Rg-3

Fuente: autor (2018)

5.2.2.2 Dimensión sociocultural

La modelación incluye 5 indicadores de la dimensión del valor sociocultural de los SE. A continuación, se realiza la descripción de los indicadores, los datos fuente, las ecuaciones para su cálculo en el modelo, las variables relacionadas y los SE valorados (tabla 5-4). Los cálculos de los indicadores y la validación estadística se especifican en el anexo D.

La pérdida de cosechas (PC) es un indicador adimensional que determina el porcentaje de pérdida de cosecha del cultivo principal y los cultivos misceláneos en el agroecosistema. El indicador se asocia al Índice de satisfacción de necesidades hídricas (ISNH) que caracteriza la disponibilidad de agua en el suelo para el cultivo y depende de la relación entre los valores de precipitación y evapotranspiración potencial (FAO-IIASA, 2000). Un mayor ISNH reduce los porcentajes de pérdida de cosecha, los estudios realizados por Téllez y Boshell (2001) asignan valores fraccionales a la pérdida de cosecha, reportados para la zona cafetera colombiana en proximidades de la región de Chinchiná (Caldas). En el modelo dinámico se analiza la relación del indicador PC con variables como precipitación, retención de humedad en el suelo y diversificación de la producción (ecuación 12). Mediante el indicador PC se valora la provisión de SE como: control de humedad, radiación y vientos (Rc-4), generación de condiciones microclimáticas favorables para especies animales y vegetales dentro del agroecosistema (Rc-5), aumento de la resiliencia del agroecosistema (Rpa-6), adaptación a condiciones cambiantes (Rpa-7) y reducción de daños a los cultivos por plagas (Rcb-24).

El indicador autosuficiencia alimentaria (AsA) propuesto por Sarandón et al. (2008) relaciona la diversificación de la producción (A1) y la superficie de producción de autoconsumo (A2). La calificación del indicador se realiza de 0 a 4 (anexo D). La calificación en el modelo se basa en los reportes de Aristizábal y Duque (2009), con un promedio del 20% del total del área dedicada a generar productos y alimentos para autoconsumo en fincas cafeteras, con hasta 11 productos diferentes, incluyendo derivados animales (carnes, lácteos y huevos) (ecuación 13). El indicador AsA valora principalmente SE como: provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32), producción de forrajes y alimentos para animales (Pa-33), producción de carne y derivados animales (lácteos, huevos) para consumo humano (Pa-34).

El índice de seguridad alimentaria (ISA) adaptado del índice de seguridad alimentaria global (2018) relaciona el porcentaje de alimentos producidos para autoconsumo del total de alimentos consumidos, el porcentaje de gasto en alimentos del total de gastos de la familia y el porcentaje de autoconsumo por nutriente asociado al total de requerimientos diarios de calorías. Se asigna una calificación de 1 a 4 a las variables del indicador según detalles del cálculo descritos en el anexo D. Las variables del indicador se calculan según lo reportado por Aristizábal y Duque (2009); Pérez-Sánchez, Rosique, Turbay y Machado (2016). En el modelo dinámico el cálculo del indicador se realiza utilizando la ecuación 14. El indicador ISA valora principalmente la provisión de SE como: aumento de la resiliencia del agroecosistema (Rpa-6), adaptación a condiciones cambiantes (Rpa-7) y provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32).

El indicador diversificación de la producción (A1) califica el número de productos generados en el agroecosistema. Según Sarandón et al., (2008) un sistema es sustentable si la producción es diversificada. La diversificación es un indicador adimensional, con calificaciones de 1 hasta 4 dependiendo del número de productos generados por año. La calificación se realiza según Aristizábal y Duque (2009) quienes encontraron hasta 11 productos diferentes en fincas cafeteras (ecuación 15). El indicador diversificación de la producción valora principalmente la provisión de SE como: aumento de la resiliencia del agroecosistema (Rpa-6), adaptación a condiciones cambiantes (Rpa-7), provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32), producción de forrajes y alimentos para animales (Pa-33), producción de carne y derivados animales (lácteos, huevos) para consumo humano (Pa-34).

El indicador participación de mujeres en concejos comunitarios (MCP) es reportado en los informes de gestión de la Federación de Cafeteros de Caldas entre los años 2005 y 2017. Los informes de gestión reflejan un incremento anual en el área sembrada con cafés especiales (café bajo sombra, certificaciones orgánicas, sostenibles y de protección de biodiversidad). En el modelo dinámico, se plantea que el incremento en las áreas sembradas con cafés especiales influencia el número de mujeres en los consejos participativos cafeteros (ecuación 16). La modelación refleja un aumento en la inclusión y participación de mujeres en la gestión de los agroecosistemas cafeteros. El MCP valora principalmente la provisión de SE como: generación y conservación de tradiciones y costumbres (Ieca-46), conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales (Iehe-47), uso de especies con fines religiosos, espirituales o históricos (Iehe-48) y generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Idce-49).

Tabla 5-4. Indicadores y SE valorados para la dimensión sociocultural

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).

Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).

Dimensión sociocultural				
Unidad	Fuente	Ecuación/Valor	FE	SE valorados
P4-CSoc-10-Indicador endógeno: pérdida de cosechas (PC)				
%	Autor (2018) basado en (Bustamante, Casanova, Numa & Monterrey, 2004)	Ecuación 12: PC = 0,000203215 × P + 0,145915976 × RHs - 0,020343131 × DP Donde: P= precipitación RHs= retención de humedad en el suelo A1= diversificación de la producción	R	Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 Polinización Rp-23 Control biológico Rcb-24 Rcb-25 Rcb-26 Regulación del microclima Rc-4 Rc-5
#	Autor (2018) basado en (Sarandón et al., 2008)	P4-CSoc-10-Indicador endógeno: autosuficiencia alimentaria (AsA) Ecuación 13: $AsA = \frac{(A1 + A2)}{2}$ Donde: A1= diversificación de la producción A2= superficie de producción de autoconsumo	R H P	Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 Rap-7 Mantenimiento de la biodiversidad biológica Hmhb-30 Alimentos Pa-32 Pa-33 Pa-34

Unidad	Fuente	Dimensión sociocultural Ecuación/Valor	FE	SE valorados
P4-CSoc-10-Indicador endógeno: índice de seguridad alimentaria (ISA)				
#	Adaptado del índice de Índice de seguridad alimentaria global (2018)	Ecuación 14: $ISA = \frac{(AsA + APA + GA + ANRC)}{4}$ Donde: AsA= autosuficiencia alimentaria APA= alimentos producidos para autoconsumo GA= gasto en alimentos ANRC= autoconsumo por nutriente y requerimiento diario de calorías	P	Alimentos Pa-32 Pa-33 Pa-34 Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 Rpa-7
#	(Sarandón et al., 2008)	Ecuación 15: A1= IF (-0,920922 +1,12140045 * RE) <4 THEN (-0,920922+1,12140045* RE) ELSE 4 Donde: RE= riesgo económico	R	Prevención de alteraciones (resiliencia) Rpa-6 Rpa-7 Pa-32 Alimentos Pa-33 Pa-34
P7-CSoc-20-Indicador endógeno: participación de mujeres en concejos comunitarios (MCP)				
# mujeres /año	Autor (2018) basado en Federación Nacional de Cafeteros de Caldas (2018)	Ecuación 16: $MCP = 0,016928508 \times ASCE$ Donde: ASCEDC= área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas	I	Enriquecimiento cultural y artístico leca-46 Enriquecimiento histórico y espiritual lehe-47 lehe-48 Desarrollo cognitivo: ciencia y educación ldce-49

Fuente: autor (2018)

5.2.2.3 Dimensión tecnológica

Para la dimensión tecnológica se modelan los indicadores: estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV), energía generada por el agroecosistema (EGA) y prácticas agroecológicas locales (PAL). La descripción de los indicadores y los servicios ecosistémicos relacionados se estipula en la tabla 5-5. Los cálculos de los indicadores y la validación estadística se especifican en el anexo D.

El indicador estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV) califica los procesos implementados para mejorar los productos generados en el agroecosistema. Se incluyen estrategias como el beneficio del café, la utilización de pulpa de café para producción de humus de lombriz, la fertilización orgánica, las prácticas agroecológicas y los mecanismos para generar cafés especiales (certificaciones orgánicas, sostenibles, protección de biodiversidad). La calificación del indicador se basa en los trabajos de Casimiro-Rodríguez (2016) y Castro (2017). En el modelo dinámico el indicador EMAV se relaciona con la diversificación de ingresos (DI) (ecuación 17), un mejor desempeño del indicador EMAV aumenta la diversificación de ingresos y reduce el riesgo económico en el agroecosistema. El EMAV valora principalmente la provisión de SE relacionados con la producción de materias primas para construcción, manufactura y procesamiento (Pmp-35), la generación de productos secundarios como leña, resinas y frutos (Pmp-36), la producción de combustibles y energía (Pmp-37), la producción de abonos verdes (Pmp-38) y la producción de fertilizantes (Pmp-39).

El indicador energía generada por el agroecosistema (EGA) determina el total de energía producida en MJ/ha-año, derivada de fertilizantes orgánicos (leña, cisco y biogás) y del producto principal (café pergamino seco) (ecuación 18). El indicador fue planteado por Funes-Monzote et al. (2011) y Altieri et al. (2012). La calificación se realiza según los aportes de energía reportados por Mora-Delgado, Ramírez y Quiros (2006); Rodríguez y Zambrano (2013); Mejía-Naranjo (2014) y Rosero, Sánchez y Narváez (2015). El cálculo detallado del indicador se presenta en el anexo D. El indicador EGA valora principalmente la provisión de SE de regulación como: reducción de emisiones de dióxido de carbono (Rg-1), incorporación de residuos de cosechas y de animales a

los flujos de materia y energía (Rar-21), provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32), producción de combustibles y energía (Pmp-37), producción de abonos verdes (Pmp-38) y producción de fertilizantes (Pmp-39).

El indicador prácticas agroecológicas locales (PAL) es un indicador cualitativo que asigna una calificación al tipo de prácticas implementadas en el agroecosistema. Estrategias relacionadas con la conservación de la vida en el suelo (PCVS), la cosecha de agua (PCA) y el control biológico (PCV) (Sarandón et al., 2008). Las prácticas agroecológicas locales valoran principalmente SE como: aumento de la resiliencia del agroecosistema (Rpa-6), adaptación a condiciones cambiantes (Rpa-7), drenaje y riego natural (Rh-9), conservación de la humedad del suelo (Rh-10), conservación del suelo productivo (Rh-11), recarga acuíferos (Rh-12), disponibilidad de agua para riego y consumo (Raa-13), mantenimiento de las tierras cultivables (Rrs-14), prevención de daños por erosión y sedimentación (Rrs-15), mantenimiento de la productividad en las tierras de cultivo (Rfs-16), producción y movilización de nutrientes (Rfs-17), provisión de cobertura para conservación de suelo y agua (Rfs-18), promoción de la biología del suelo por adición de materia orgánica y excreciones radiculares (Rfs-19), la detoxificación de elementos nocivos (Rfs-20), incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21), control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos (Rar-22), presencia de insectos mejorando la polinización de los cultivos (Rp-23), reducción de daños a los cultivos por plagas (Rcb-24), generación de hábitats para variedad de insectos benéficos, enemigos naturales de insectos indeseables (Rcb-25), control de poblaciones de insectos plaga a través de depredación, parasitoidismo y competencia (Rcb-26) y producción de sustancias químicas para estimular componentes deseados (sustancias alelo-químicas, repelentes, etc.) (Rcb-27).

Tabla 5-5. Indicadores y SE valorados para la dimensión tecnológica

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).					
Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).					
Unidad	Fuente	Ecuación/Valor	FE	SE valorados	
P8-CTec-22-Indicador endógeno: estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV)					
#	Autor (2018) basado en (Casimiro-Rodríguez, 2016; Castro, 2017)	Ecuación 17: $EMAV = IF (-0,429111598 * DI + 1,686035334 * TIME) < 4$ THEN $(-0,429111598 * DI + 1,686035334 * TIME) ELSE 4$ Donde: DI= stock diversificación de ingresos	P	Materias primas	Pmp-35 Pmp-36 Pmp-37 Pmp-38 Pmp-39
P8-CTec-23-Indicador endógeno: energía generada por el agroecosistema (EGA)					
<i>MJ ha año</i>	(Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012)	Ecuación 18: $EGA = EL + ECPS + EBiog + EC$ Donde: EFO= energía de fertilizantes orgánicos EL= energía de leña generada en el agroecosistema EBiog= energía de biogás generada en biodigestores EC= energía generada por cisco ECPS= energía generada por el café pergamino seco	R	Regulación de gases Asimilación de residuos Alimentos	Rg-1 Rar-21 Pa-32
P8-CTec-23-Indicador endógeno: prácticas agroecológicas locales (PAL)					
#	Autor (2018) basado en (Sarandón et al., 2008)	Ecuación 19: $PAL = \frac{(PCVS + PCA + PCB)}{3}$ Donde: PCVS= prácticas de conservación de la vida en el suelo PCA= prácticas de cosecha de agua PCB= prácticas de control biológico	H R	Hábitat Mantenimiento de la diversidad biológica Prevención de alteraciones (resiliencia) Regulación hídrica	Hab-28 Hab-29 Hmdb-30 Hmdb-31 Rpa-6 Rpa-7 Rh-8 Rh-9 Rh-10 Rh-11

Unidad	Fuente	Dimensión tecnológica Ecuación/Valor	FE	SE valorados
				Rh-12
		Abastecimiento de agua		Raa-13
		Retención de suelo		Rrs-14 Rrs-15
				Rfs-16
		Formación de suelo y regulación de nutrientes		Rfs-17 Rfs-18 Rfs-19 Rfs-20
				Rar-21 Rar-22
		Asimilación de residuos		Rp-23
		Polinización		Rcb-24
				Rcb-25
		Control biológico		Rcb-26 Rcb-27

Fuente: autor (2018)

5.2.2.4 Dimensión económica

En la dimensión económica del valor de los SE se modelaron siete (7) indicadores. La descripción de los indicadores modelados y los servicios ecosistémicos relacionados se estipulan en la tabla 5-6, los cálculos de los indicadores y la validación estadística se especifica en el anexo D. A continuación, se describen los indicadores de la dimensión económica:

Las prácticas de control biológico (PCB) se constituyen en un indicador adimensional basado en la propuesta de Nicholls (2008). Las PCB califican las estrategias implementadas para reducir o eliminar el uso de sustancias de síntesis química en el control de plagas y enfermedades. La calificación de las PCB refleja las estrategias de aplicación de bioplaguicidas, conservación y manejo de enemigos naturales de plagas y manipulación de la vegetación natural adyacente a los campos de cultivo (función gráfica 3, tabla 5-6). Las PCB valoran principalmente la provisión de SE de regulación como: reducción de daños a los cultivos por plagas (Rcb-24), generación de hábitats para variedad de insectos benéficos, enemigos naturales de insectos indeseables (Rcb-25), control de poblaciones de insectos plaga a través de depredación, parasitoidismo y competencia (Rcb-26) y producción de sustancias químicas para estimular componentes deseados (sustancias alelo-químicas, repelentes, etc.) (Rcb-27).

El balance energético (BE) es un indicador determinado por la diferencia entre la energía generada por el agroecosistema (EGA) y la energía inyectada al agroecosistema proveniente del exterior (EIAPE) en MJ/ha-año (ecuación 20). El indicador es propuesto por Funes-Monzote et al. (2011); Altieri et al. (2012) y Casimiro-Rodríguez (2016). La energía generada, se deriva de los fertilizantes orgánicos, los combustibles producidos (leña, cisco y biogás) y el producto principal (café pergamino seco). La energía inyectada proviene de los fertilizantes de síntesis química, los jornales, los combustibles fósiles utilizados (gasolina) y la electricidad. El BE valora principalmente la provisión de SE de regulación y producción como: incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21), provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32), producción de combustibles y energía (Pmp-37), producción de abonos verdes (Pmp-38) y producción de fertilizantes (Pmp-39).

El indicador rendimiento de los productos (RP) es propuesto por Funes-Monzote et al. (2011); Altieri et al. (2012) y Casimiro-Rodríguez (2016). Para el agroecosistema tipo se determinan los datos en kg/ha-año del producto principal, el café pergamino seco. Los datos para el cálculo del indicador se realizan según los rendimientos reportados por Rosero et al. (2015); Farfan y Sánchez (2016). En la modelación el indicador RP es influenciado por el balance energético (BE), la dinámica media de

sombra (DS), las prácticas agroecológicas locales (PAL) y la pérdida de cosechas (PC) (ecuación 21). El RP valora el SE de provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32).

La diversificación de ingresos (DI) es un indicador adimensional que refleja el número de cultivos complementarios al cultivo principal, los productos secundarios generados para comercialización y las actividades conexas a la actividad agrícola. El indicador propuesto por Sarandón et al. (2008) refleja la capacidad de comercializar más de un producto, reduciendo las pérdidas o daños del cultivo principal al compensarlo con otros productos o actividades. El indicador se calcula según los supuestos del agroecosistema tipo y las estrategias de diversificación para caficultores reportadas por Osorio, Aramburo y Morales (2011). En el modelo dinámico la DI se relaciona con variables como: generación de empleo agrícola (GEA), diversificación de la producción (A1), estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV) y valorización de residuos (VR) (ecuación 22). Los SE valorados por el indicador DI se relacionan con la producción de materia primas para construcción, manufactura y procesamiento (Pmp-35), la generación de productos secundarios como leña, resinas y frutos (Pmp-36), la producción de combustibles y energía (Pmp-37), la producción de abonos verdes (Pmp-38), la producción de fertilizantes (Pmp-39), la provisión de semillas y/o especies locales adaptadas (Pps-40) y la generación de actividades conexas (Turismo rural) (Ire-44).

El indicador valorización de residuos (VR) determina la cantidad de residuos en Kg/ha-año generados por el agroecosistema y posteriormente aprovechados. El indicador propuesto por Funes-Monzote et al. (2011); Altieri et al. (2012) y Casimiro-Rodríguez (2016) considera la valorización de los residuos del proceso de beneficio (pulpa de café, mucilago) y el residuo del proceso de trillado (cisco) (ecuación 23). El cálculo del indicador se realiza según los supuestos del modelo y los rendimientos de café pergamino seco reportados por Rosero et al. (2015); Farfan y Sánchez (2016). Los cálculos y parámetros de equivalencia entre los rendimientos de café pergamino seco y los subproductos generados son detallados en el anexo D. La VR valora la provisión de SE de regulación y producción como: reducción de emisiones de dióxido de carbono (Rg-1), incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21), producción de combustibles y energía (Pmp-37), producción de abonos verdes (Pmp-38) y producción de fertilizantes (Pmp-39).

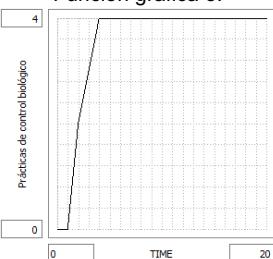
El indicador generación de empleo agrícola (GEA) propuesto por Mora-Delgado (2004) mide el número de jornales externos generados por unidad de área (jornales/ha). Para el cálculo del indicador se utilizan las siguientes equivalencias: 82,6 Kg de café cereza producidos generan un jornal externo y un puesto de trabajo requiere 173 jornales (Salazar et al., 2016). El indicador GEA valora en la modelación principalmente SE de provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32).

La calidad de vida (CV) es un indicador adimensional basado en la propuesta de Valdivieso (2011). La CV mide el nivel de bienestar del grupo familiar en el agroecosistema, derivado de la ponderación del nivel educativo (NE), el índice de seguridad alimentaria (ISA), el riesgo económico (RE) y el acceso a agua potable (AAP). Un puntaje mayor de CV traduce en mejores condiciones de NE, ISA, RE y AAP para el grupo familiar (ecuación 25). La CV valora en la modelación SE como: disponibilidad de agua para riego y consumo (Raa-13), control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos (Rar-22), provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32), producción de forrajes y alimentos para animales (Pa-33), producción de carne y derivados animales (lácteos, huevos) para consumo humano (Pa-34), generación y conservación de tradiciones y costumbres (Ieca-46), conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales (Iehe-47) y generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Idce-49).

Tabla 5-6. Indicadores y SE valorados para la dimensión económica

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).

Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).

Dimensión económica					
Unidad	Fuente	Ecuación/Valor	FE	SE valorados	
P9-CEcon-29-Indicador endógeno: prácticas de control biológico (PCB)					
#	(Autor, 2018) basado en (Nicholls, 2008)	 $PCB = UB + \frac{(CpDis + PInsBEN)}{2} + MVNA$ <p>Donde: UB= utilización de bioplaguicidas CpDIS= reducción de prácticas disturbantes como el control de malezas con herbicidas y el arado PInsBEN= provisión de recursos suplementarios para incremento de poblaciones de insectos benéficos MVNA= manipulación de la vegetación natural adyacente a los campos de cultivo</p>	R	Control Biológico Hábitat	Rcb-24 Rcb-25 Rcb-26 Rcb-27 Hab-28 Hab-29
$\frac{MJ}{ha \ año}$	(Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	<p>Ecuación 20: BE= IF TIME <1 THEN -1329,27 ELSE -2557,4798+ 15,9195*Stock EIAPE- 0,050382247*Stock EG</p> <p>Donde: EIAPE= energía inyectada al agroecosistema proveniente del exterior EGA= energía generada por el agroecosistema</p>	H	Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb-31
P9-CEcon-25-Indicador endógeno: balance energético (BE)					
$\frac{Kg}{ha \ año}$	(Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	<p>Ecuación 21: RP= -0,001512355*BE- 0,59554793*DS+1798,674442*PAL- 5594,222315*PC</p> <p>Donde: BE= balance energético DS= dinámica media de sombra PAL= prácticas agroecológicas locales PC= pérdida de cosechas</p>	P	Asimilación de residuos Alimentos Materias primas	Rar-21 Pa-32 Pmp-36 Pmp-37 Pmp-38 Pmp-39
P9-CEcon-26-Indicador endógeno: rendimiento de los productos (RP)					
#	(Osorio, Aramburo & Morales, 2011)	<p>Ecuación 22: DI= IF (0,097055175*GEA +0,154748918*A1 +0,444053816*EMAV +0,000106906*VR) <4 THEN (0,097055175*GEA +0,154748918*A1 +0,444053816*EMAV +0,000106906*VR) ELSE 4</p> <p>Donde: GEA= generación de empleo agrícola A1= diversificación de la producción EMAV= estrategias o mecanismos de agregación de valor VR= valorización de residuos</p>	P	Alimentos	Pa-32
P9-CEcon-27-Indicador endógeno: diversificación de ingresos (DI)					
#	(Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)	<p>Ecuación 23: VR = Muc + Pulp + Cisc</p> <p>Donde: Muc= residuo mucilago Pulp= residuo pulpa de café Cisc= residuo cisco del café</p>	R	Regulación de gases Asimilación de residuos Materias primas	Rg-1 Rar-21 Pmp-35 Pmp-36 Pmp-37 Pmp-38 Pmp-39 Pps-40 Prm-41 Pro-42 Ire-44 Rpa-6 Rpa-7
P9-CEcon-27-Indicador endógeno: valorización de residuos (VR)					
$\frac{Kg}{ha \ año}$	(Autor, 2018) basado en (Funes-Monzote et al., 2011; Altieri et al., 2012; Casimiro-Rodríguez, 2016)				

Dimensión económica					
Unidad	Fuente	Ecuación/Valor	FE	SE valorados	
P10-CEcon-30-Indicador endógeno: generación de empleo agrícola (GEA)					
# Jornales externos generados/área	(Mora-Delgado, 2004)	Ecuación 24: GEA= IF TIME<2 THEN 0 ELSE 0,0000000000000544+ 0,005780347*Jor -0,000000000000005769*RE Donde: Jor= número de jornales externos labor ha/año RE= riesgo económico	P	Alimentos	Pa-32
P10-CEcon-31-Indicador endógeno: calidad de vida (CV)					
#	Autor (2018) basado en (Valdivieso, 2011)	Ecuación 25: $CV = \frac{(NE + ISA + 1/RE + AAP)}{4}$ Donde: NE= nivel educativo ISA= índice de seguridad alimentaria RE= riesgo económico AAP= acceso a agua potable tratada	I	Enriquecimiento cultural y artístico Enriquecimiento histórico y espiritual Desarrollo cognitivo: ciencia y educación	Ieca-46 Iehe-47 Idce-49
			R	Asimilación de residuos Abastecimiento de agua	Rar-22 Raa-13
			P	Alimentos	Pa-32 Pa-33 Pa-34

Fuente: autor (2018)

5.2.2.5 Dimensión política

Para la dimensión política se modelan cuatro (4) indicadores: capacitación y sensibilización ambiental (CSA), nivel educativo (NE), factor de acceso a crédito (AC) y área con agroecosistemas sostenibles (ASCEDC) (tabla 5-7). Los cálculos de los indicadores y la validación estadística se describen en el anexo D. A continuación, se describen los indicadores de la dimensión política:

El indicador capacitación y sensibilización ambiental (CSA) mide el número de personas/año capacitadas mediante asistencias técnicas y actividades o acciones de educación ambiental, en temas relacionados con el cuidado del medio ambiente, la producción sostenible y la postulación y obtención de certificaciones. El indicador se establece según datos históricos reportados en los informes de gestión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia entre los años 2005 y 2017. Los SE relacionados con el indicador son: generación de actividades recreativas para la comunidad local (Ir-45), generación y conservación de tradiciones y costumbres (Ieca-46), conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales (Iehe-47) y generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Idce-49).

El indicador nivel educativo (NE) evalúa el nivel de educación básica primaria, secundaria o superior, alcanzado por los miembros de la unidad familiar del agroecosistema. El indicador es propuesto por esta investigación basado en Portela (2001). El indicador se calcula según los datos reportados por Moore, Flórez y Grajeda (2010) relacionados con la evolución de los programas educativos y el nivel de escolaridad de los cafeteros en el departamento de Caldas. En el modelo dinámico, el indicador NE se relaciona con la variable capacitación y sensibilización ambiental (CSA) (ecuación 27). Los SE relacionados con el indicador son: generación y conservación de tradiciones y costumbres (Ieca-46), conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales (Iehe-47) y generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Idce-49).

El indicador factor de acceso a crédito (AC) representa el nivel de impacto del crédito sobre la mejora de la calidad de vida de los productores de café en Colombia, según estudios realizados por Peñaloza (2014); Echavarría, Villamizar-Villegas y McAllister (2016). El factor de acceso a crédito influencia al indicador calidad de vida (CD) en el modelo dinámico. Un puntaje mayor de acceso a crédito favorece el mejoramiento del nivel educativo (NE), el índice de seguridad alimentaria (ISA), la reducción del riesgo económico (RE) y el acceso agua potable (AAP). Los SE

relacionados con el indicador son: disponibilidad de agua para riego y consumo (Raa-13), control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos (Rar-22), provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32), producción de forrajes y alimentos para animales (Pa-33), producción de carne y derivados animales (lácteos, huevos) para consumo humano (Pa-34), generación y conservación de tradiciones y costumbres (leca-46), conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales (lehe-47) y generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Idce-49).

En la modelación dinámica, el indicador área con agroecosistemas sostenibles evalúa el cambio en área (ha/año) sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC). El indicador se establece según datos históricos reportados en los informes de gestión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia entre los años 2005 y 2017. Los datos muestran un aumento en las áreas con cafés especiales (certificaciones orgánicas, sostenibles, protección de la biodiversidad). En el modelo dinámico, un aumento en el área con cafés especiales refleja el incremento en las áreas con agroecosistemas sostenibles y la reducción de las áreas sembradas con café a pleno sol, generalmente con baja implementación de prácticas agroecológicas (ecuación 28). Los SE relacionados con el indicador son: aumento de la resiliencia del agroecosistema (Rpa-6), adaptación a condiciones cambiantes (Rpa-7), disponibilidad de agua para riego y consumo (Raa-13), mantenimiento de las tierras cultivables (Rrs-14), prevención de daños por la erosión y la sedimentación (Rrs-15), control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos (Rar-22), mantenimiento de las condiciones ideales para especies animales o vegetales dentro del agroecosistema (Hab-28), generación de condiciones para refugio, alimentación y sitio de reproducción (Hab-29), conservación de material genético (Hmdb-30), provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32), producción de materia primas para construcción, manufactura, procesamiento (Pmp-35), generación de productos secundarios como leña, resinas y frutos (Pmp-36), producción de combustibles y energía (Pmp-37), producción de abonos verdes (Pmp-38), producción de fertilizantes (Pmp-39) y provisión de semillas o especies locales adaptadas (Pps-40).

Tabla 5-7. Indicadores y SE valorados para la dimensión política

Principio (P), criterio (C), adimensional (Adim.), número de (#).					
Funciones ecosistémicas (FE): regulación (R), producción (P), hábitat (H) e información (I). Servicios ecosistémicos (SE).					
Dimensión política					
Unidad	Fuente	Ecuación/Valor	FE	SE valorados	
P12-CPol-36-Indicador exógeno: capacitación y sensibilización ambiental (CSA)					
<i>Personas</i>	Federación de cafeteros de Caldas (2018)	Ecuación 26: CSA= 3386,57 * COS (TIME - 313,348) + 71,4747 * COS (2 * TIME - 313,348) + 5433,44	I	Recreación Enriquecimiento cultural y artístico Enriquecimiento histórico y espiritual Desarrollo cognitivo: ciencia y educación	Ir-45 leca-46 lehe-47 Idce-49
#	Autor (2018) basado en (Portela, 2001)	Ecuación 27: IF 0,000106438* CSA + 0,247185509* TIME <3,7 THEN 0,000106438* CSA + 0,247185509* TIME ELSE 3,6 Donde: CSA= capacitación y sensibilización ambiental	I	Enriquecimiento cultural y artístico Enriquecimiento histórico y espiritual Desarrollo cognitivo: ciencia y educación	leca-46 lehe-47 Idce-49
P11-CPol-34-Indicador exógeno: factor de acceso a crédito (AC)					
Adim.	(Peñaloza, 2014; Echavarría, Villamizar-Villegas & McAllister, 2016)	AC = 1,3 Factor de impacto del crédito sobre la calidad de vida de los productores de café en Colombia.	I	Enriquecimiento cultural y artístico Enriquecimiento histórico y espiritual Desarrollo cognitivo: ciencia y educación	leca-46 lehe-47 Idce-49
			R	Asimilación de residuos	Rar-22

Dimensión política					
Unidad	Fuente	Ecuación/Valor	FE	SE valorados	
				Abastecimiento de agua	Raa-13
				Pa-32	
			P	Alimentos	Pa-33
					Pa-34
		P11-CPol-32-Indicador endógeno: área con agroecosistema sostenibles: área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC)			
				Prevención de alteraciones (resiliencia)	Rpa-6 Rpa-7
				Regulación hídrica	Rh-8 Rh-12
			R	Abastecimiento de agua	Raa-13
				Formación de suelo y regulación de nutrientes	Rrs-14 Rrs-15
				Asimilación de residuos	Rar-22
				Formación de suelo y regulación de nutrientes	Rfs-16
			H	Hábitat	Hab-28 Hab-29
				Mantenimiento de la diversidad biológica	Hmdb- 30
				Alimentos	Pa-32
			P	Materias primas	Pmp-36 Pmp-37 Pmp-38 Pmp-39
				Recursos genéticos	Pps-40
			I	Recursos Estéticos	Ire-43 Ire-44

Fuente: autor (2018)

5.3 Paso 6 - validación

La validación del modelo formal en dinámica de sistemas evalúa la calidad del modelo y los resultados obtenidos con la realidad del sistema modelado. A partir de las reflexiones de Forrester (1985), Forrester y Senge (1996), Godoy y Bartó (2002), Sargent (2009), Qudrat-Ullah y Seong (2010) se plantea la validación desde tres aspectos: el aporte al conocimiento y la comprensión del sistema, la correspondencia de la estructura del modelo con el sistema y la correspondencia entre el comportamiento modelado y el comportamiento real del sistema.

5.3.1 Aporte al conocimiento y la comprensión del sistema

Según Forrester (1985), Godoy y Bartó (2002) y Sargent (2009) la calidad del modelo puede medirse por el conocimiento generado en el proceso de construcción y el aporte a la comprensión del sistema. Al respecto, se mencionan los aportes al conocimiento generados en el proceso de construcción del modelo:

- Propuesta de principios, criterios e indicadores de valoración de SE.
- Validación de los principios y criterios mediante la consulta a 68 expertos. Fortaleciendo la reflexión y retroalimentando las definiciones propuestas (anexo C).
- Identificación de las relaciones entre dimensiones, principios y criterios con las funciones y los SE en agroecosistemas sostenibles (anexo A, tabla A-3).
- Definición de las relaciones entre los indicadores propuestos y los SE valorados (numeral 4.2).
- Planteamiento de un modelo general de valoración de SE en agroecosistemas sostenibles. Modelo derivado de la integración de los ciclos causales parciales de cada dimensión del valor (numeral 4.3, Figura 4-6).

- Establecimiento de un agroecosistema sostenible tipo, definición del método para su identificación y de las características para su selección.

Los aportes contribuyen a identificar la importancia de los agroecosistemas sostenibles en la generación de servicios ecosistémicos y el papel de los SE en el mantenimiento de los agroecosistemas.

5.3.2 Correspondencia de la estructura del modelo

La validez estructural del modelo de simulación es interpretada como el comportamiento correcto por las razones correctas. La validez es una medida para crear confianza en un modelo de simulación, independientemente de las pruebas de validez de comportamiento (Qudrat-Ullah & Seong, 2010).

- Adecuada definición de los límites del sistema

Los indicadores endógenos (aquellos que son calculados por el modelo) son pertinentes y apropiados para el logro del objetivo de la modelación, valorar los SE generados por agroecosistemas sostenibles.

- Verificación de la estructura que representa apropiadamente el conocimiento que se tiene sobre el sistema estudiado

El modelo basado en dinámica de sistemas integra el marco de valoración desde la agroecología y la economía ecológica, basado en la articulación de las bases teóricas y conceptuales, los enfoques de valoración, el concepto de agroecosistema sostenible y el valor multidimensional. En el modelo diseñado se incluye la “no linealidad” entre los indicadores estudiados, sus interrelaciones y causalidades.

La validación de las hipótesis dinámicas por dimensión (los ciclos causales) se realiza mediante tres estrategias: la primera, la validación de los principios y criterios de valoración mediante consulta a 68 expertos (anexo B) para verificar la pertinencia de los criterios y los indicadores involucrados. La segunda, el contrastar las hipótesis con las relaciones, dependencias e influencias entre variables e indicadores que fueron reportados en la literatura científica por medio de resultados y ecuaciones (capítulo 4, numeral 4.2). Finalmente, la tercera estrategia consiste en la consulta a investigadores con experiencia en modelación en dinámica de sistemas y en estudios sobre agroecosistemas. Investigadores que verifican los ciclos causales y las relaciones identificadas, aportando sobre su coherencia y pertinencia. Aportes que se integraron a los ciclos causales parciales y a la modelación realizada.

- Consistencia dimensional

Los datos usados en el cálculo de los indicadores del modelo fueron llevados a unidades de hectárea / año, según los supuestos del modelo. Igualmente, los indicadores adimensionales, se calcularon aplicando los criterios de evaluación, para la asignación de su valor, en la misma escala numérica.

5.3.3 Correspondencia del comportamiento modelado

Considerando que las condiciones iniciales del modelo son ajustadas a un tiempo en el pasado del agroecosistema tipo estudiado, el comportamiento del modelo debe replicar los datos históricos entre ese tiempo y el presente, considerando aspectos de la calidad de la información base. La capacidad que tengan las ecuaciones de representar los datos reales es evaluada al utilizar el indicador del porcentaje de error medio absoluto (Mean Absolute Porcentaje Error-MAPE).

El error porcentual absoluto medio (MAPE) también conocido como desviación promedio absoluta porcentual (MAPD), mide la exactitud de un método para la construcción ajustada de valores de serie de tiempo en estadísticas. El error porcentual absoluto medio (MAPE) se define de la siguiente manera:

$$MAPE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left\{ \left| \frac{(x_i - \hat{x}_i)}{x_i} \right| \times 100 \right\}$$

Siendo x_i el valor reportado, \hat{x}_i el valor calculado mediante la ecuación del indicador definida para el modelo, y "n" el número de datos en la serie de tiempo. Los detalles del cálculo del MAPE son presentados en el anexo D, para los indicadores descritos en la tabla 5-8. La selección de los indicadores a los cuales se les aplicó el MAPE correspondió con aquellos que fueron reportados por la literatura, un menor MAPE indica un mejor ajuste en el valor calculado a través de la ecuación propuesta frente a la información real.

Tabla 5-8. Cálculo de MAPE para indicadores seleccionados

Indicador	MAPE
Rendimiento café pergamino seco	6,25%
Materia orgánica en el Suelo	12,9%
Actividad biológica en el suelo	15,9%
Área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas	19,2%
Establecimiento forestal	13,6%

Fuente: autor (2018)

Los valores de error porcentual absoluto medio (MAPE) presentados en la tabla 5-8 son menores al 20%. Valor considerado aceptable en la validación de sistemas dinámicos (Barlas, 1989).

5.4 Paso 7 - análisis de resultados

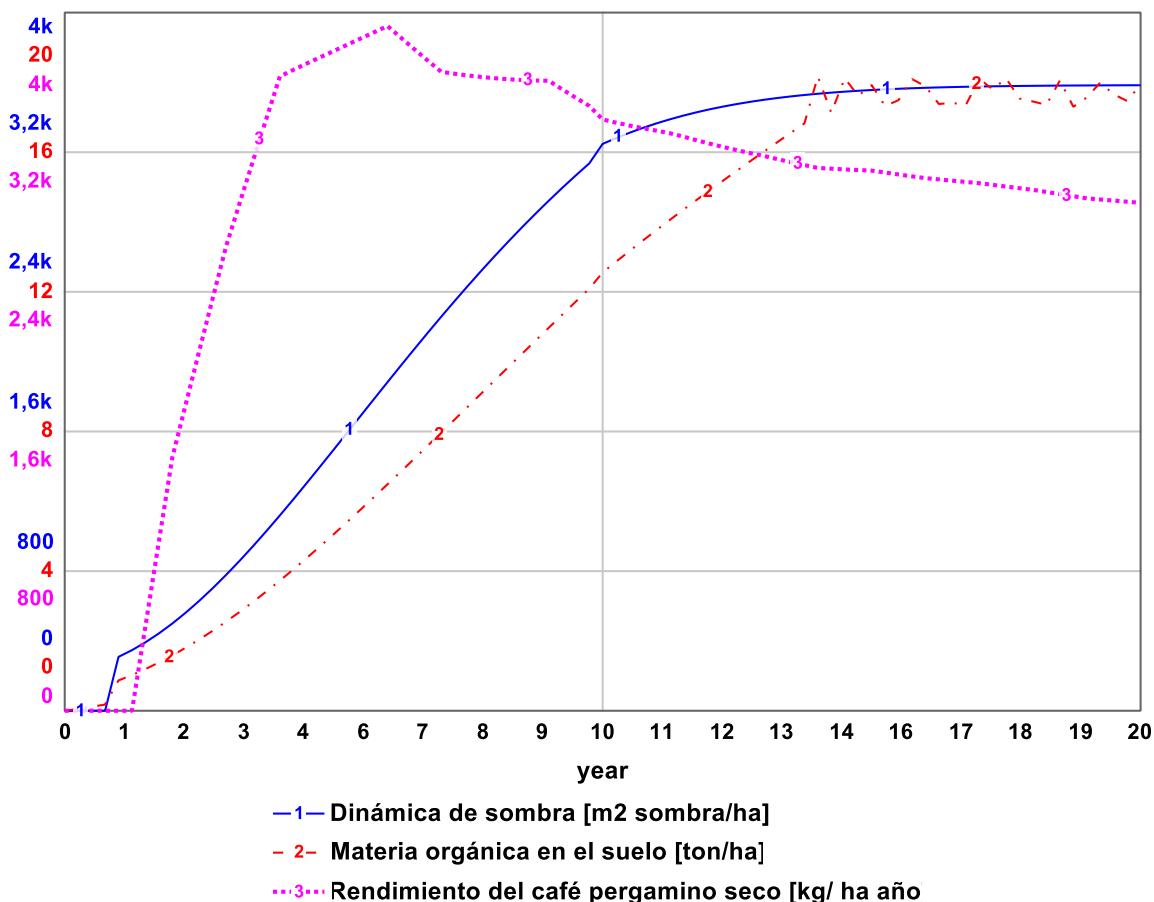
El modelo entre los años cero (0) y diez (10) refleja el comportamiento con los valores calculados para el agroecosistema tipo, según los supuestos del modelo y los datos por indicador recopilados de los diferentes autores. Siguiendo las tendencias de la información base durante los primeros diez años, la estimación del comportamiento de los indicadores y sus relaciones inician a partir del año 11.

5.4.1 Dimensión ecológica

Los indicadores de la dimensión ecológica modelados, reflejan la aplicación del principio de reducción de los efectos ambientales negativos que pueden afectar la estructura, los procesos y las funciones ecosistémicas (PEcol-3) y de los criterios derivados: CEcol-6, CEcol-7, Cecol-8, CEcol-9. El criterio de generación de microclimas que disminuyen las pérdidas de agua y suelo derivadas de la radiación solar y el arrastre de los vientos (CEcol-6), se evalúa en la modelación por medio del indicador dinámica media de sombra (DS). El criterio conservación, manejo y uso

racional del agua (CEcol-7), se implementa en la modelación por medio del indicador prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA). El criterio disminución de la degradación y la pérdida del suelo, conservación y mejora de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (CEcol-8), se incluye en la modelación por medio de los indicadores materia orgánica en el suelo (MOs), densidad aparente (DA), actividad biológica en el suelo (Abs), aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S) y prácticas de conservación de la vida en el suelo (PCVS). Finalmente, para la dimensión ecológica se evalúa el criterio reducción de la emisión de gases de efecto invernadero e incremento de su captura y almacenamiento (CEcol-9), por medio del indicador captura de CO₂ (CDC). A continuación, se detallan los resultados obtenidos por indicador:

Figura 5-2. Modelación: dinámica de sombra (DS)



Fuente: autor (2018)

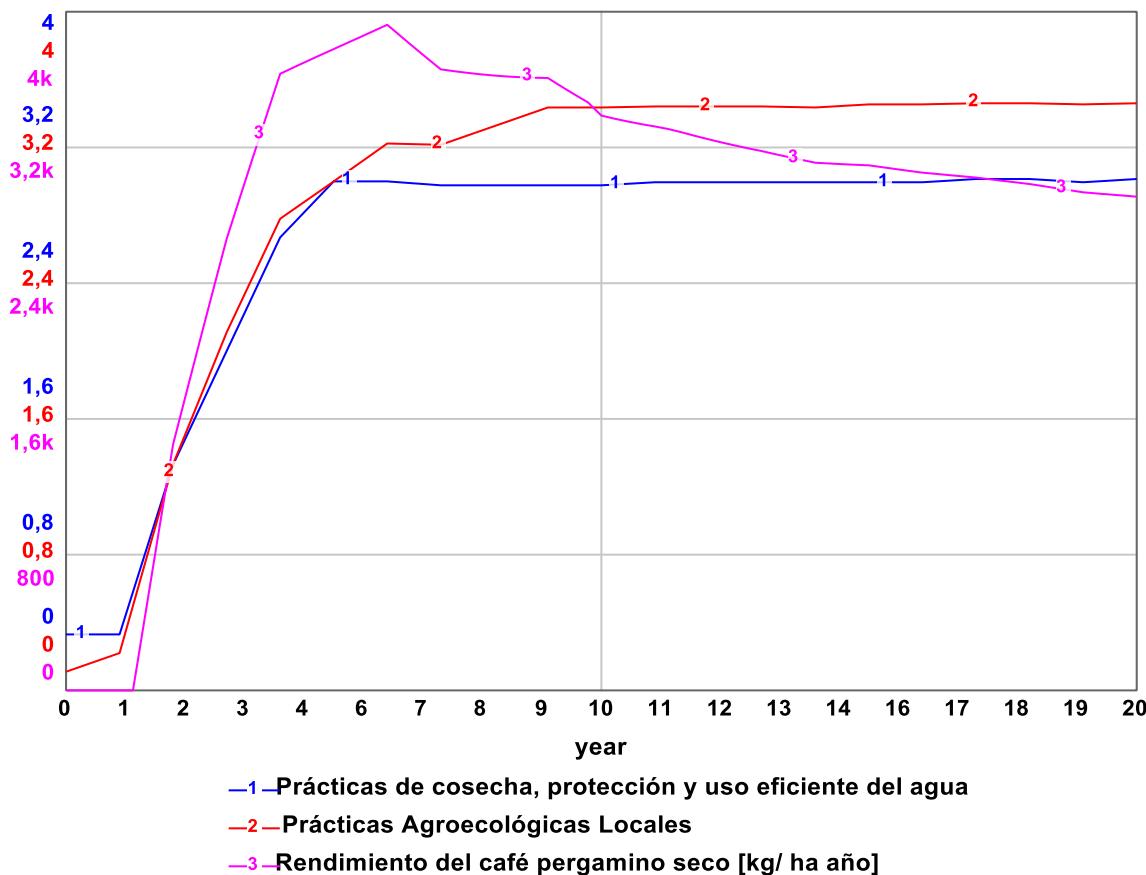
Los resultados obtenidos del indicador dinámica media de sombra (DS) (m^2 sombra/ha) dependen de las variables número de árboles por hectárea (NA) y área de sombra (AS), el AS varía dependiendo de la edad de los árboles (anexo D). La modelación parte del supuesto de un total de 70 árboles/ha plantados en el año cero, con un distanciamiento de siembra de 12 por 12 metros. El indicador DS modelado, arroja valores de 403,29 m^2 sombra/ha en el primer año hasta 3116,61 m^2 sombra/ha en el año 10. A partir del año 11 la modelación refleja una reducción en el incremento de los valores del indicador DS, en el año 20 la modelación genera un máximo de 3630 m^2 sombra/ha (figura 5-2). Los datos generados por la modelación muestran un porcentaje de sombrío en el año 10 de 31%, hasta el 36% alcanzado en el año 20, datos que concuerdan con el porcentaje óptimo de sombra del 35,8% para el municipio de Chinchiná en el departamento de

Caldas (Farfan & Jaramillo, 2013). El grado de sombra depende de la radiación solar anual, la nubosidad y el cultivo, un exceso o deficiencia de sombra se refleja en cambios en la producción.

La modelación refleja que un cambio en el número de árboles plantados impacta el comportamiento de la dinámica de sombra (DS) y de los indicadores materia orgánica en el suelo (MOs), rendimiento del café pergamo seco (Kg/ha-año) y energía de leña generada en el agroecosistema (MJ/ha-año). La modelación refleja que un cambio en la edad de los árboles plantados varía el comportamiento de los indicadores dinámica media de sombra (DS), biomasa de árboles en el agroecosistema (Kg/ha) y retención de humedad en el suelo, afectando a su vez la provisión de los SE especificados en la tabla 5-3.

El indicador prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA) en la modelación genera valores mínimos de 0,33 (año 1) y máximos de 3 (año 10), la proyección del comportamiento del indicador del año 11 al 20, refleja una estabilización en un puntaje máximo de 3. Esta calificación se deriva de la implementación de estrategias como: conservación del agua en el suelo por medio del aporte de materia orgánica de los árboles plantados, regulación de agua lluvia y neblina por medio de árboles de sombrío y la generación de fertilizantes orgánicos a partir de la transformación de residuos de cosecha. En la modelación un cambio en el puntaje obtenido por las PCA afecta directamente el comportamiento del indicador prácticas agroecológicas locales (PAL) de la dimensión tecnológica y los SE relacionados (tabla 5-3), e indirectamente el indicador rendimiento del café pergamo seco (Kg/ha-año) de la dimensión económica (figura 5-3).

Figura 5-3. Modelación: prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA)

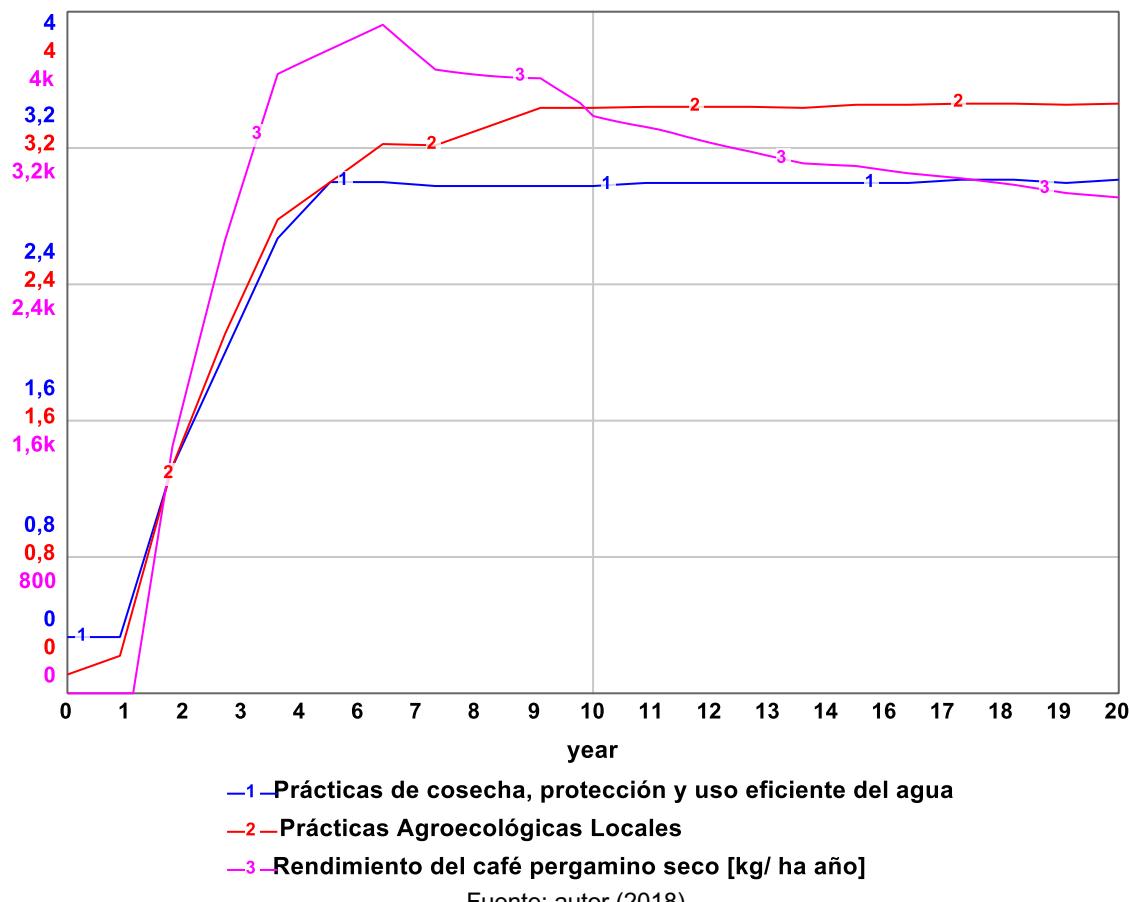


Fuente: autor (2018)

Respecto al indicador materia orgánica en el suelo (MOs), el modelo genera valores de hojarasca aportada por los árboles desde 0,65 ton/ha hasta 13 ton/ha en el año 10. La proyección del indicador refleja una estabilización entre 13 y 14 ton/ha-año desde el año 11 al año 20. La MOs se relaciona con la generación de fertilizantes orgánicos provenientes de la descomposición de la hojarasca en Kg/ha-año como: fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Aportes calculados según factores de conversión reportados por Farfán, Baute, Sánchez y Menza (2013).

En la modelación el indicador MOs influencia el comportamiento de la densidad aparente (DA) y la retención de humedad en el suelo (RHs) (figura 5-4). Un mayor aporte de materia orgánica en forma de hojarasca reduce los valores de densidad aparente (DA) (g/cm^3). La modelación arroja valores de 1,7 g/cm^3 en el año 1 hasta 0,8 g/cm^3 en el año 10. La proyección del comportamiento de la densidad aparente genera valores mínimos de 0,7 g/cm^3 en el año 20. La reducción de los valores de DA reflejan una mejora en la porosidad, aireación y drenaje del suelo (Salamanca & Sadeghian, 2005).

Figura 5-4. Modelación: materia orgánica en el suelo (MOs)

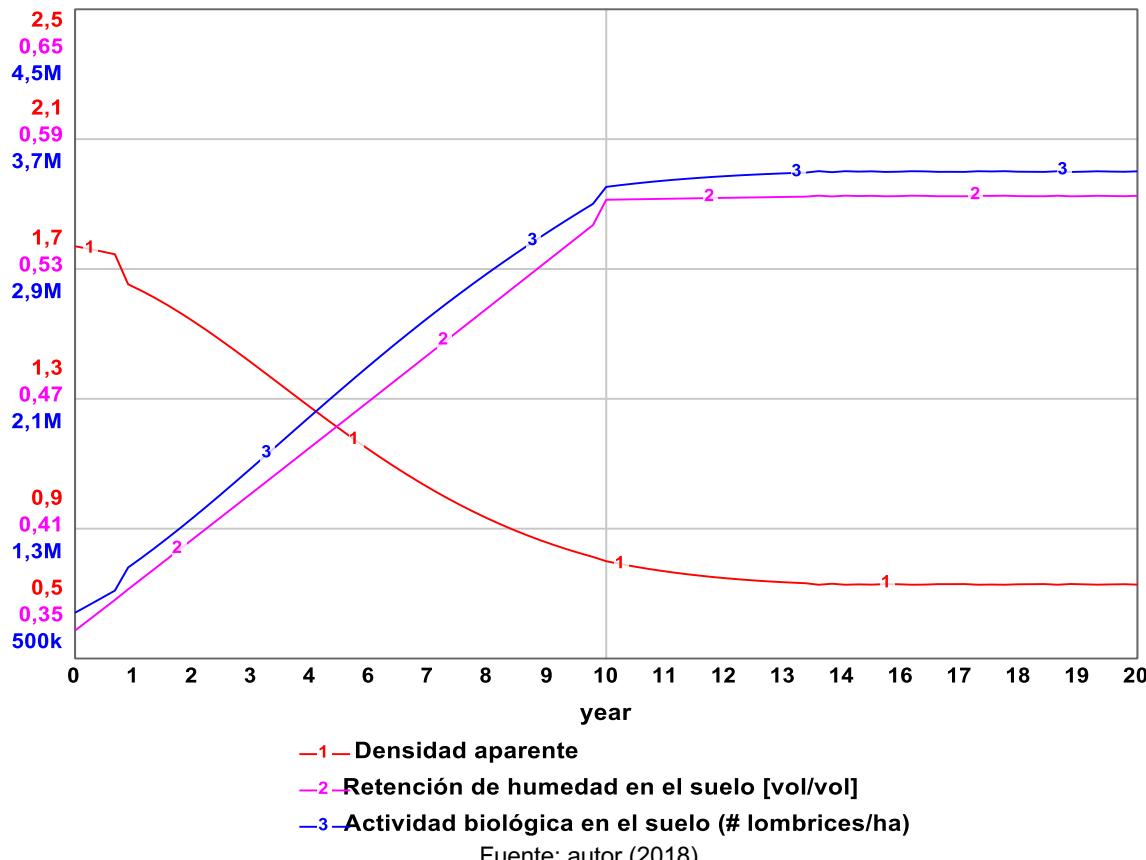


Fuente: autor (2018)

La MOs mejora la retención de humedad en el suelo (RHs), determinada por la relación entre el volumen de agua y el volumen total o aparente del suelo seco (Cardona & Sadeghian, 2006). La modelación indica una mejora en el indicador desde 0,37 (año 1) hasta un máximo de 0,56 (año 10), con una estabilización de los valores de RHs alrededor de 0,60 en el año 20. Los datos generados por el modelo coinciden con lo reportado por Cardona y Sadeghian (2006), con un valor máximo de 56% de humedad volumétrica a 20 cm de profundidad en un agroecosistema de café bajo sombra con 10 años de establecido.

El indicador actividad biológica en el suelo (Abs) determina el número de lombrices/m² hasta 10 cm de profundidad. La modelación arroja valores desde 115 lombrices/m² en el primer año de establecimiento hasta 402 lombrices/m² en el año 10. La proyección del modelo al año 20 muestra una estabilización en valores cercanos a 400 lombrices/m². El indicador Abs es influenciado por el comportamiento de los indicadores retención de humedad en el suelo y densidad aparente. Una mayor RHs y una menor DA, mejoran las condiciones del indicador actividad biológica en el suelo, condiciones a su vez influenciadas por el aumento de la materia orgánica en el suelo (MOs) (figura 5-5).

Figura 5-5. Modelación: actividad biológica en el suelo (Abs)



Fuente: autor (2018)

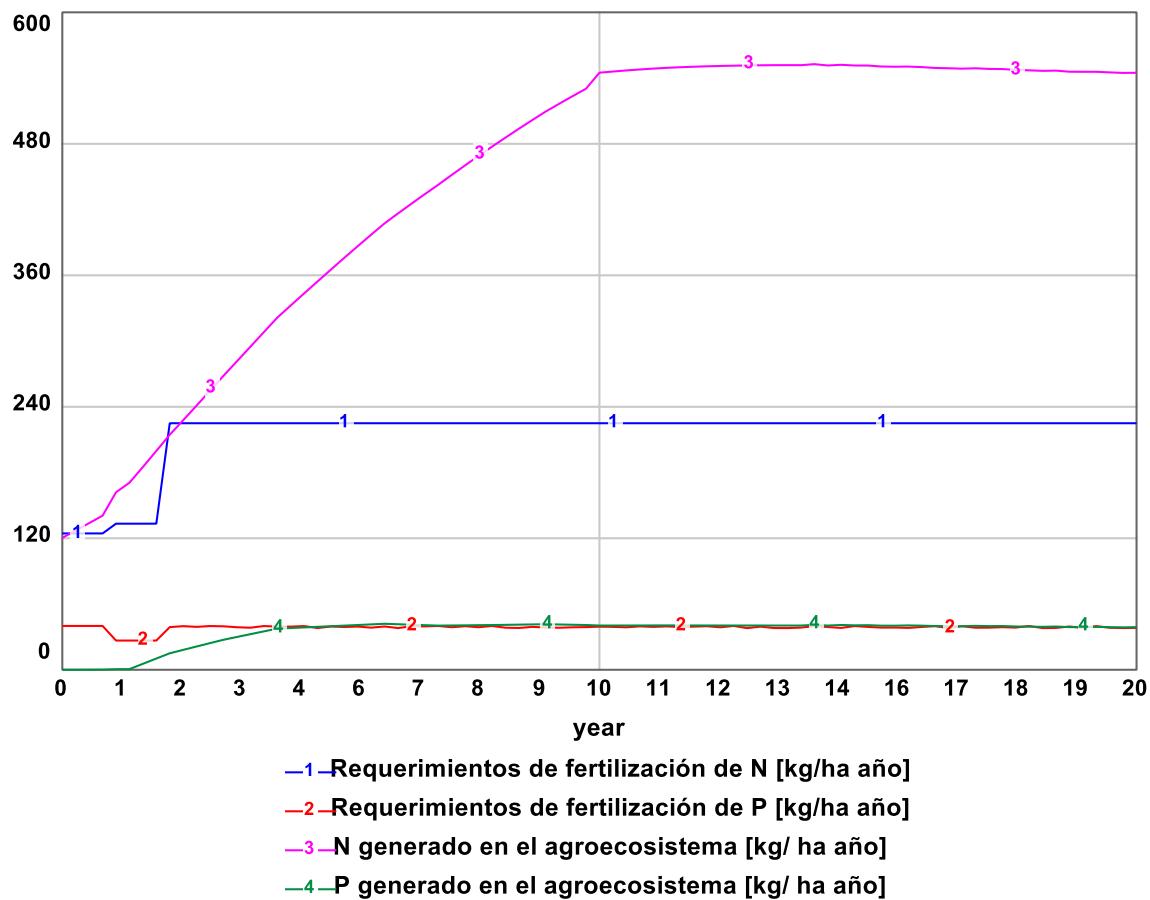
El indicador aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S) determina el aporte en Kg/ha-año de los elementos nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg) y azufre (S), derivados de la descomposición de la materia orgánica en el suelo (MOs) y el humus de lombriz producido en el agroecosistema (HLP). La modelación arroja los siguientes valores de aporte para cada elemento: 176,6 Kg/ha de nitrógeno para el primer año hasta 616 Kg/ha en el año 10 (ecuación 6). 0,39 Kg/ha de fósforo (P) para el primer año hasta 43,22 Kg/ha en el año 10 (ecuación 7). 2,45 Kg/ha de potasio (K) para el primer año hasta 80,48 Kg/ha en el año 10 (ecuación 8). 1,37 Kg/ha de magnesio (Mg) para el primer año hasta 48,35 Kg/ha en el año 10 (ecuación 9) y 1,06 Kg/ha de azufre (S) para el segundo año hasta 10,53 Kg/ha en el año 10 (ecuación 10).

Los requerimientos de fertilización de síntesis química en kg/ha-año para 4444 plantas de café/ha bajo sombra con un distanciamiento de 1,5 por 1,5 metros, se calculan según lo reportado por Sadeghian y González (2012). Para el año 0: 0,028 kg/planta (N), 0,009 kg/planta (P), 0,005

kg/planta (K), 0,002 kg/planta (Mg). Para el año 1: 0,03 kg/planta (N), 0,006 kg/planta (P), 0,01 kg/planta (K), 0,003 kg/planta (Mg) y desde al año 2 en adelante: 225 kg/ha (N), 38 kg/ha (P), 195 kg/ha (K), 38 kg/ha (Mg) y 38 kg/ha (S).

El análisis de los elementos generados por descomposición de la materia orgánica, el humus de lombriz producido en el agroecosistema (N, P, K, Mg, S) y los requerimientos de los mismos elementos derivados de fertilizantes de síntesis química, muestran una reducción de los insumos de síntesis química durante los 10 primeros años de la siguiente manera: nitrógeno (N) 96,64% de reducción, fósforo (P) 64,98% de reducción, potasio (K) 25,06% de reducción, magnesio (Mg) 71,09% de reducción y azufre (S) 22,33% de reducción. La modelación refleja dependencia de insumos externos de nitrógeno (N) desde al año 0 hasta el año 3 con 4,86, 5,03, 41,04 y 25,71 kg/ha, fósforo (P) desde al año 0 hasta el año 3 con 40, 26,28, 33,37 y 25,71 kg/ha, desde el año 4 los fertilizantes producidos cubren los requerimientos totales de nitrógeno y fósforo (figura 5-6).

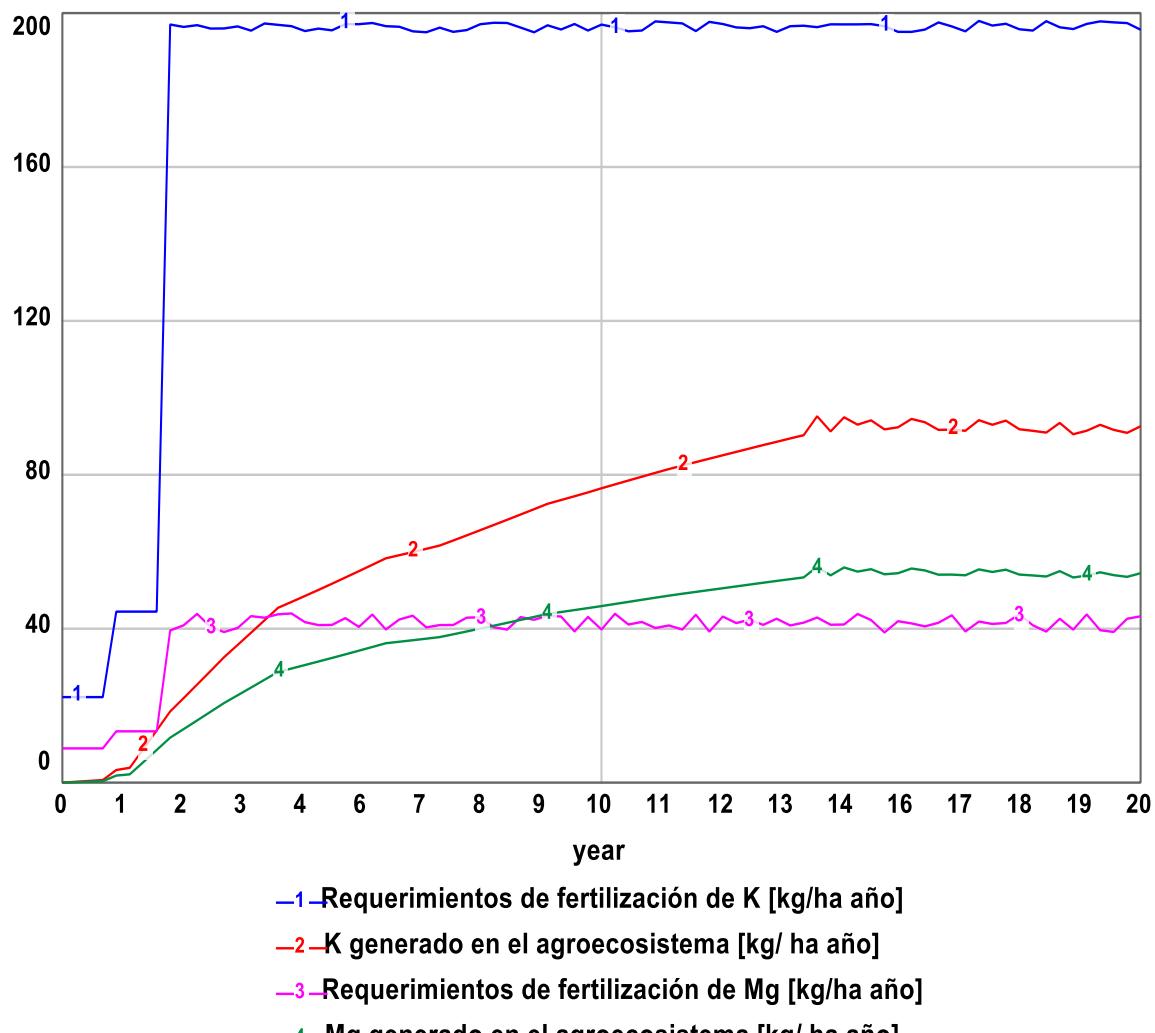
Figura 5-6. Modelación: fertilizantes orgánicos generados (N, P)



Fuente: autor (2018)

La modelación del potasio (K) refleja una dependencia desde 22,22 kg/ha en el año 0 hasta 114,52 kg/ha en el año 10. El magnesio (Mg) presenta una dependencia en el año 0 de 8,89 kg/ha hasta el año 7 con 0,74 kg/ha. En el año 8 el modelo refleja que los fertilizantes producidos en el agroecosistema cubren los requerimientos totales de magnesio (Mg) (figura 5-7). En el caso del azufre (S) se presenta una dependencia desde el año 3 con 36,94 kg/ha reduciéndose a 27,47 kg/ha en el año 10 hasta el año 20.

Figura 5-7. Modelación: fertilizantes orgánicos generados (K, Mg)

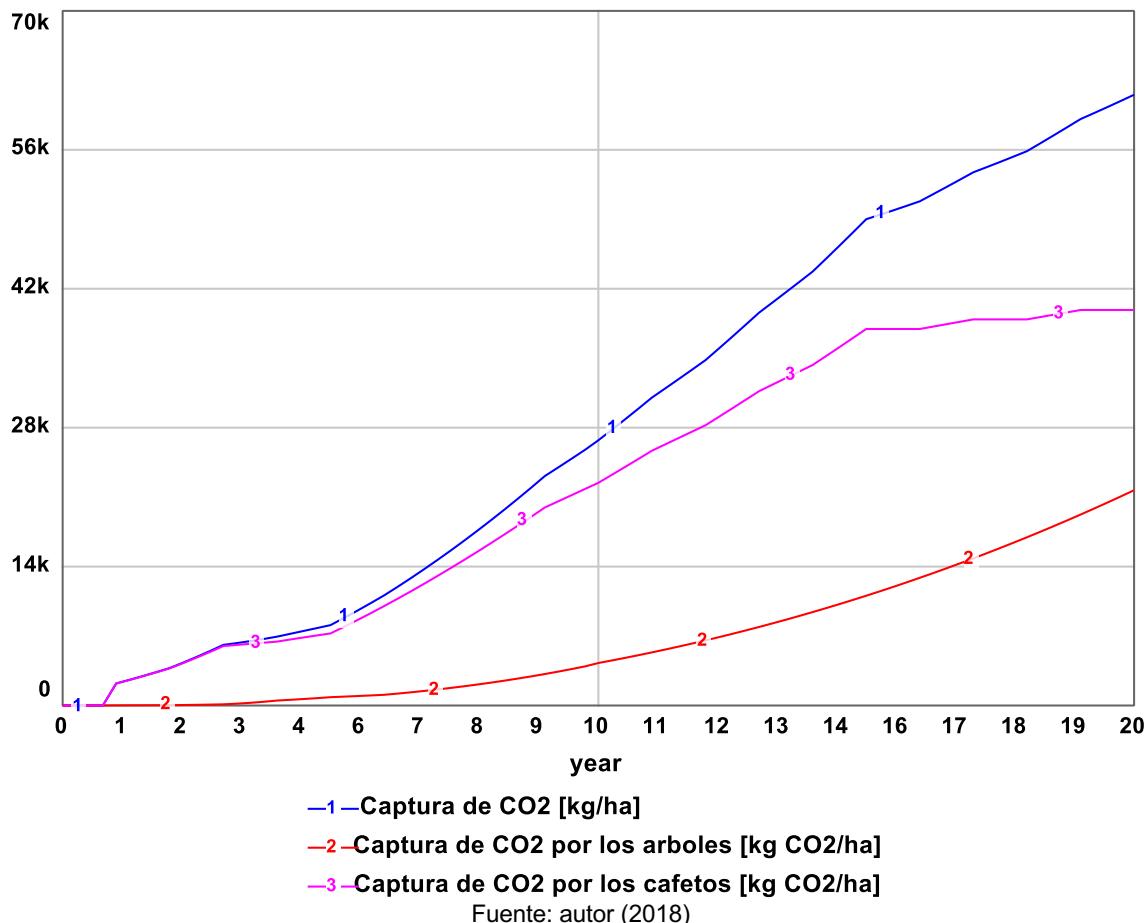


Fuente: autor (2018)

Respecto al indicador prácticas de conservación de la vida en el suelo (PCVS), la modelación arroja puntajes de 0,33 para el año 1 hasta 3,33 para el año 10, evidenciando la evolución del indicador en el tiempo. La calificación se otorga por las prácticas de manejo de la cobertura vegetal que proveen al suelo de una protección contra los agentes climáticos y disminuyen el riesgo de erosión. Prácticas como la dinámica de sombra, establecida por la plantación de árboles y el crecimiento de los cafetos, la vegetación natural dentro y fuera del agroecosistema y la implementación de cercas vivas que diversifican las especies y favorecen la biodiversidad asociada (Acuna & Antonio, 2016).

El indicador captura de CO₂ (CDC) en la biomasa de árboles y cafetos genera valores de 2214,18 Kg de CO₂-eq/ha capturados en el año 1 hasta 24235,75 Kg de CO₂-eq/ha en el año 10. La proyección del indicador muestra una estabilización hacia el año 20 con una captura de 59100 Kg de CO₂-eq/ha (figura 5-8). La captura de CO₂ en el agroecosistema se relaciona con la biomasa generada, aportada al suelo en forma de hojarasca, materia orgánica y por el crecimiento de los árboles y cafetos.

Figura 5-8. Modelación: captura de CO₂



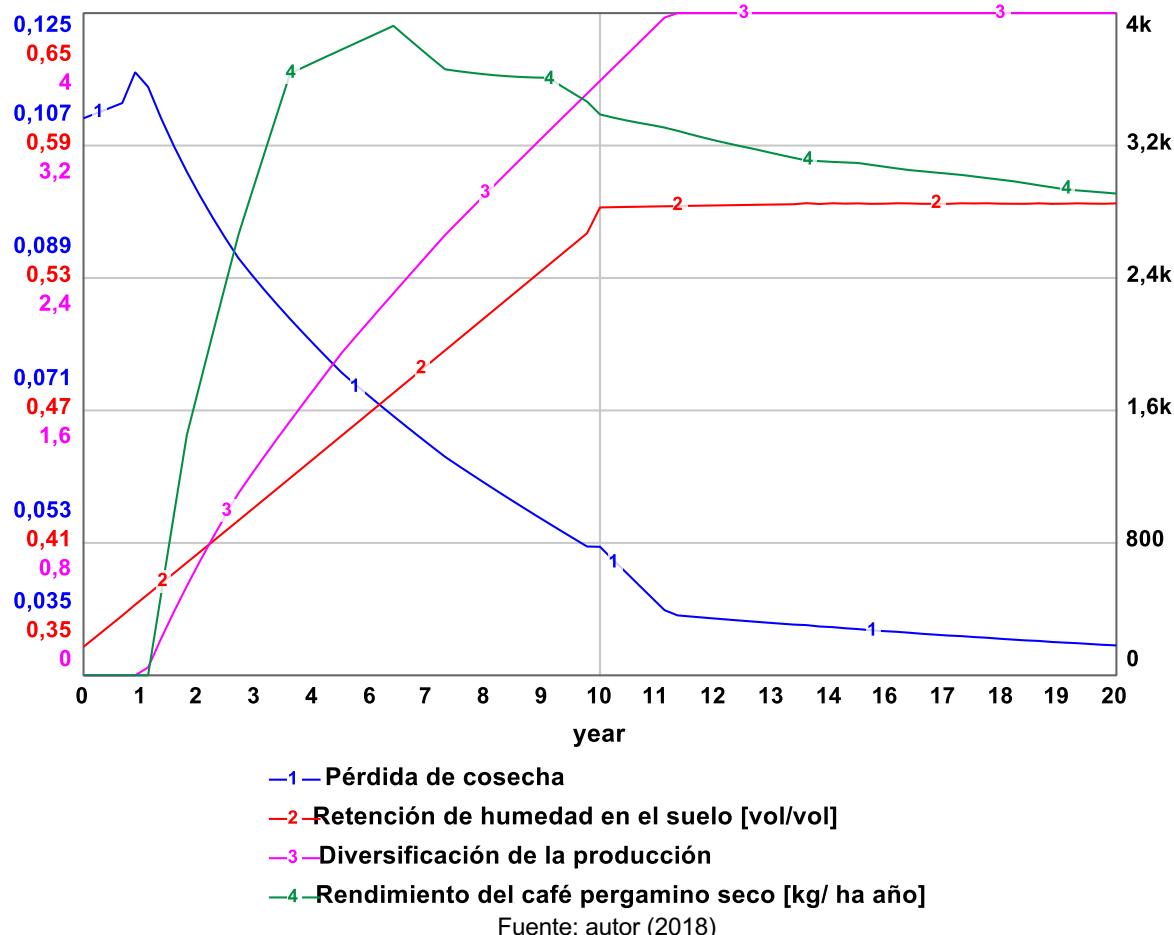
5.4.2 Dimensión sociocultural

Para la dimensión sociocultural, los indicadores modelados se relacionan con el principio de generación de bienes y servicios que aportan a la seguridad alimentaria de la población bajo condiciones cambiantes derivadas de perturbaciones y eventos extremos (PSoc-4). Específicamente con el criterio de reducción de la vulnerabilidad del agroecosistema al cambio climático y la variabilidad climática (CSoc-10), mediante los indicadores: pérdida de cosechas (PC), autosuficiencia alimentaria (AsA), índice de seguridad alimentaria (ISA) y diversificación de la producción (A1). Para la dimensión se evalúa la implementación del principio de mantenimiento y mejoramiento de la cohesión social, de manera que se conserven los procesos y las funciones ecosistémicas (PSoc-7), mediante el criterio relacionado al aumento de la inclusión social de minorías y grupos vulnerables en la gestión del agroecosistema y en la distribución de sus beneficios (CSoc-20). El criterio CSoc-20 se analiza con el indicador denominado participación de mujeres en concejos comunitarios (MCP). A continuación, se especifican los resultados obtenidos por indicador:

En la dimensión sociocultural la modelación del indicador pérdida de cosechas (PC) genera valores de 0.1 (10%) para los años 1 y 2, reduciendo paulatinamente el porcentaje en el año 7 a 0,05 (5%) y a 0,02 (2%) en el año 10. Los porcentajes máximos de pérdida de cosechas corresponden con lo reportado por Téllez y Boshell (2001) respecto a los posibles escenarios de

cambio climático y el rendimiento de los cultivos en Colombia. La reducción en el año 10 al 2% de PC estimado por el modelo, se relaciona con el aumento de la resiliencia del agroecosistema y la adaptación a condiciones cambiantes. Aumento de la resiliencia derivado de la implementación de prácticas agroecológicas que mejoran la retención de humedad del suelo, generan condiciones microclimáticas favorables para los cultivos de autoconsumo y el cultivo principal, aumentan la diversificación y reducen la incidencia de plagas y enfermedades mejorando el rendimiento (figura 5-9).

Figura 5-9. Modelación: pérdida de cosechas (PC)

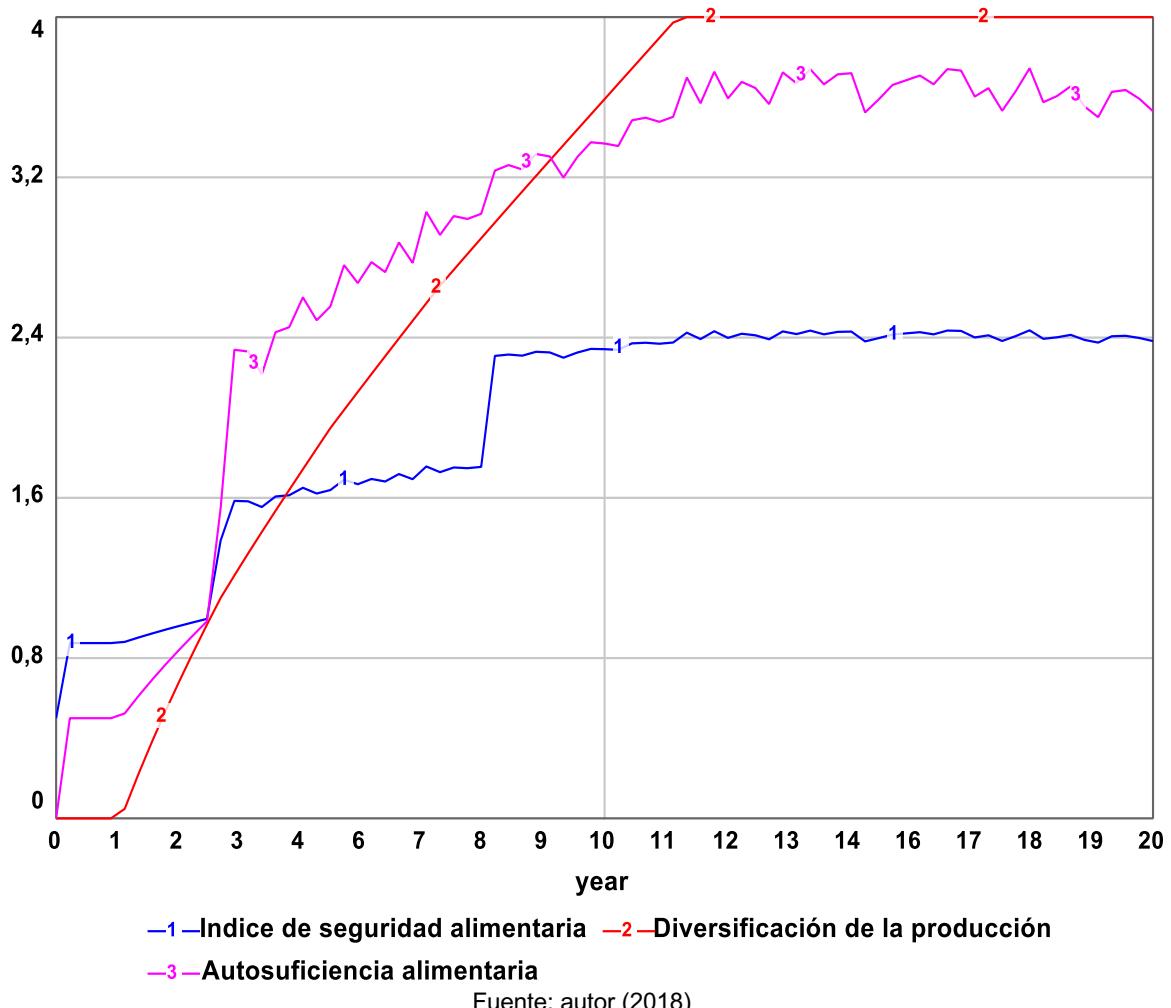


Los resultados del modelo para el indicador autosuficiencia alimentaria (AsA) varían en el tiempo, desde una calificación de 1 (año 1) hasta una calificación de 3,5 en el año 10. Resultados obtenidos con 1 hectárea dedicada a la producción para autoconsumo (A2) y un supuesto de 9 productos que mejoran la diversificación de la producción (A1), acorde a lo reportado por Aristizábal y Duque (2009) para fincas cafeteras con hasta 11 productos de autoconsumo. La proyección del indicador en el año 20 arroja una calificación de 3,7 aumentando el número de productos hasta un máximo de 11 y manteniendo la superficie de producción constante (A2) en 1 ha.

El índice de seguridad alimentaria (ISA) modelado varía desde una calificación de 1 (Año 1) hasta una calificación de 2,4 (año 10). La máxima calificación posible del ISA es de 4, el resultado del año 10 (2,4) indica un índice de seguridad alimentaria medio para el agroecosistema tipo modelado.

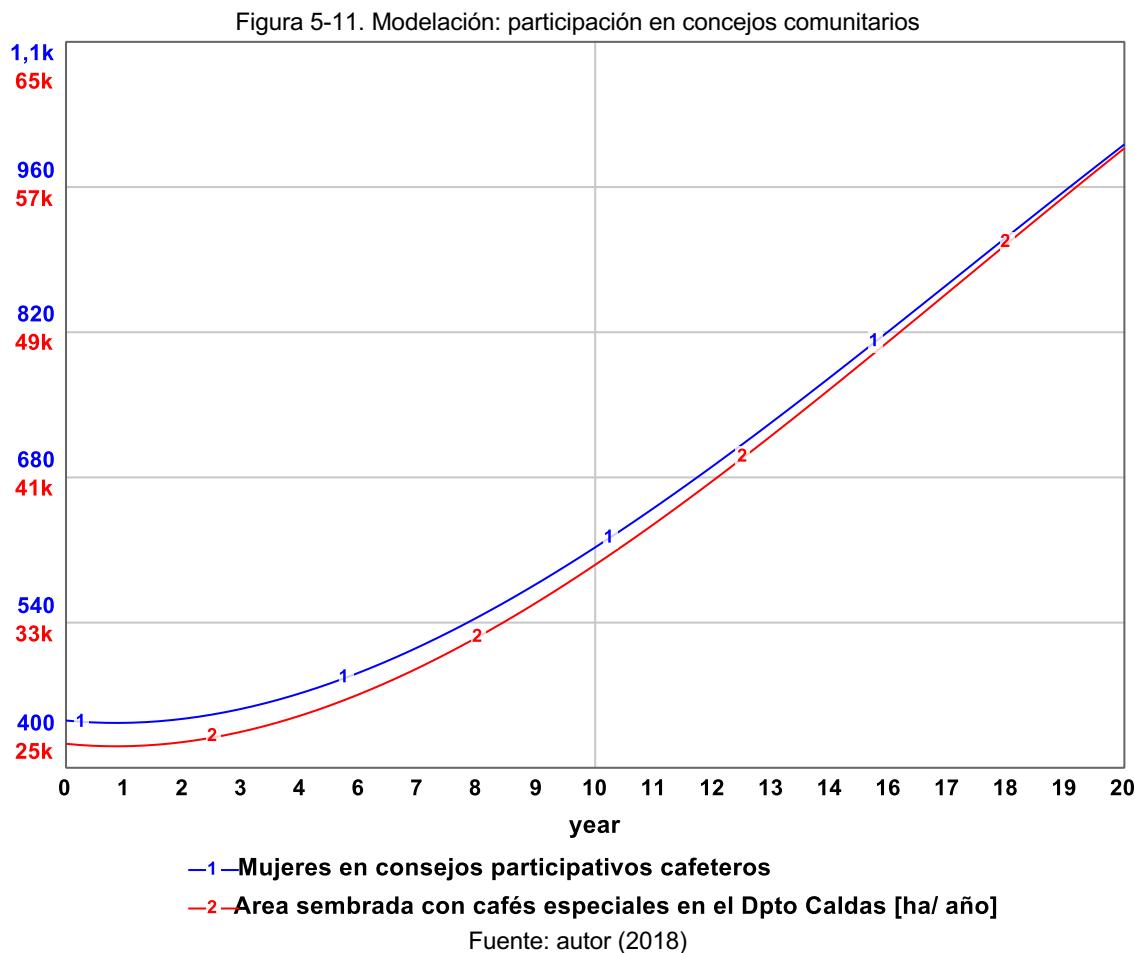
En el año 10 se obtiene una producción para autoconsumo del 30% al 59% del total de alimentos requeridos, en la misma proporción se reduce el gasto de alimentos y la demanda de nutrientes y calorías. Los resultados del modelo concuerdan con los porcentajes determinados por Pérez-Sánchez et al. (2016) en relación con el cubrimiento de las necesidades alimenticias por autoconsumo, logrando suplir hasta un 42% de los requerimientos de alimentos, nutrientes y calorías (figura 5-10).

Figura 5-10. Modelación: índice de seguridad alimentaria (ISA)



Fuente: autor (2018)

Finalmente, para la dimensión sociocultural se modela el indicador participación en concejos comunitarios (MCP), reportado en los informes de gestión de la Federación de Cafeteros de Caldas entre los años 2005 y 2017. Los datos (figura 5-11) proyectan un aumento de la participación del año 10 al año 20 de un 60%, en la modelación el indicador MCP encuentra relacionado al aumento de las áreas sembradas con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC).



5.4.3 Dimensión tecnológica

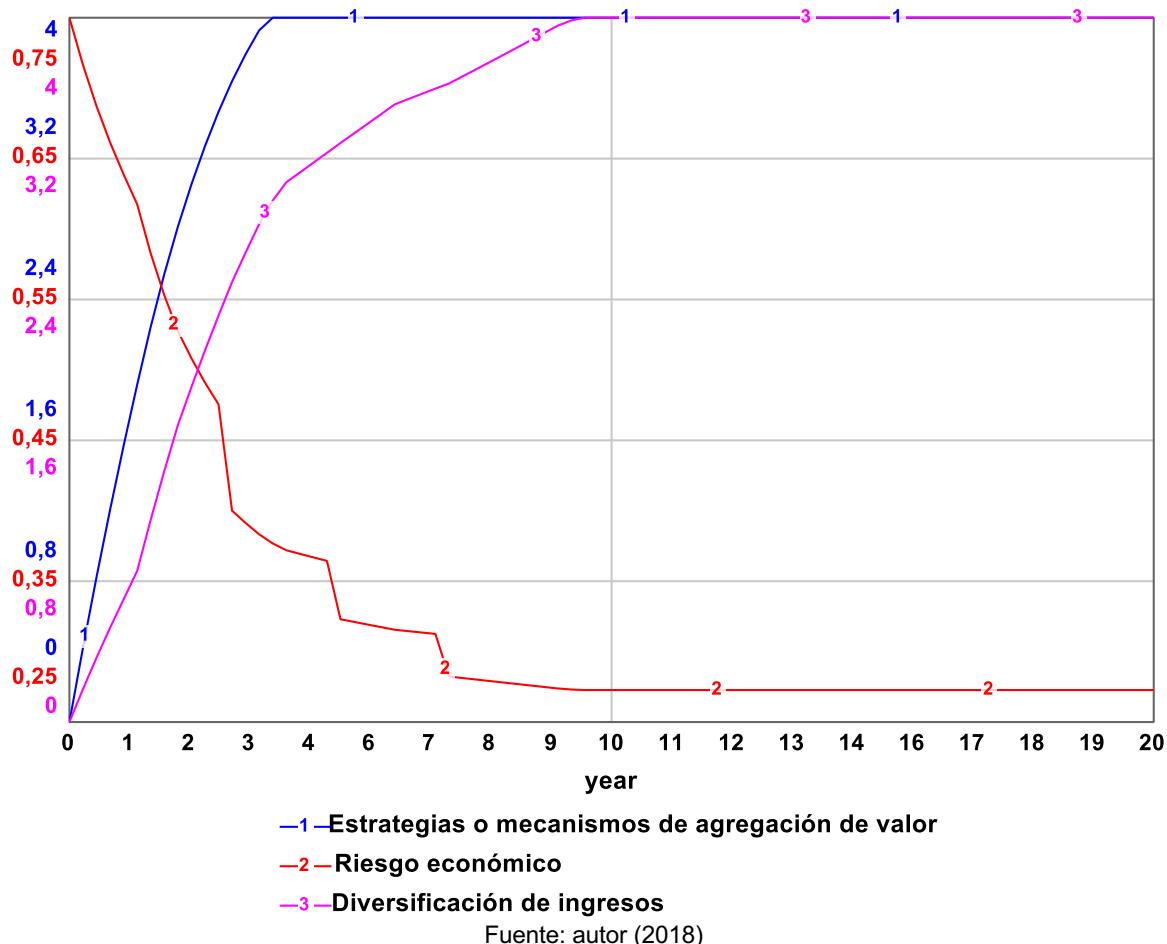
En la dimensión tecnológica la modelación evalúa los SE relacionados con la inclusión del conocimiento tradicional y científico, el aumento la soberanía tecnológica y la conservación de los procesos y las funciones ecosistémicas (PTec-8). El principio es analizado mediante el criterio (CTec-22): generación y uso de tecnologías innovadoras, subordinadas a las funciones ecosistémicas locales y adaptadas a las necesidades y recursos de las comunidades. En la modelación se proyecta el comportamiento del indicador denominado estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV).

En la dimensión tecnológica se evalúan los SE relacionados con el criterio CTec-23: inclusión del conocimiento y las prácticas locales en el diseño y manejo del agroecosistema, reconociendo y conservando los sistemas agrícolas patrimoniales. El criterio (CTec-23) se evalúa por medio de los indicadores energía generada por el agroecosistema (EGA) y prácticas agroecológicas locales (PAL). A continuación, se describen los resultados obtenidos en la modelación para los indicadores de la dimensión tecnológica:

Para el indicador estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV) que califica los procesos implementados para mejorar o transformar los productos, se generaron calificaciones de 0 en los años 1 y 2, en los que el agroecosistema no genera productos que puedan ser transformados o mejorados. A partir del año 3 al año 10, se obtiene una calificación de 4, calificación

derivada de la producción de café cereza, la transformación en café pergamo seco, la generación de gas a partir de mucilago y producción de humus de lombriz a partir de la pulpa de café. En el modelo el indicador EMAV influencia el comportamiento de la diversificación de ingresos (DI) y el riesgo económico (RE). A mayores estrategias o mecanismos de agregación de valor, se aumenta la diversificación de ingresos reduciendo el riesgo económico (figura 5-12).

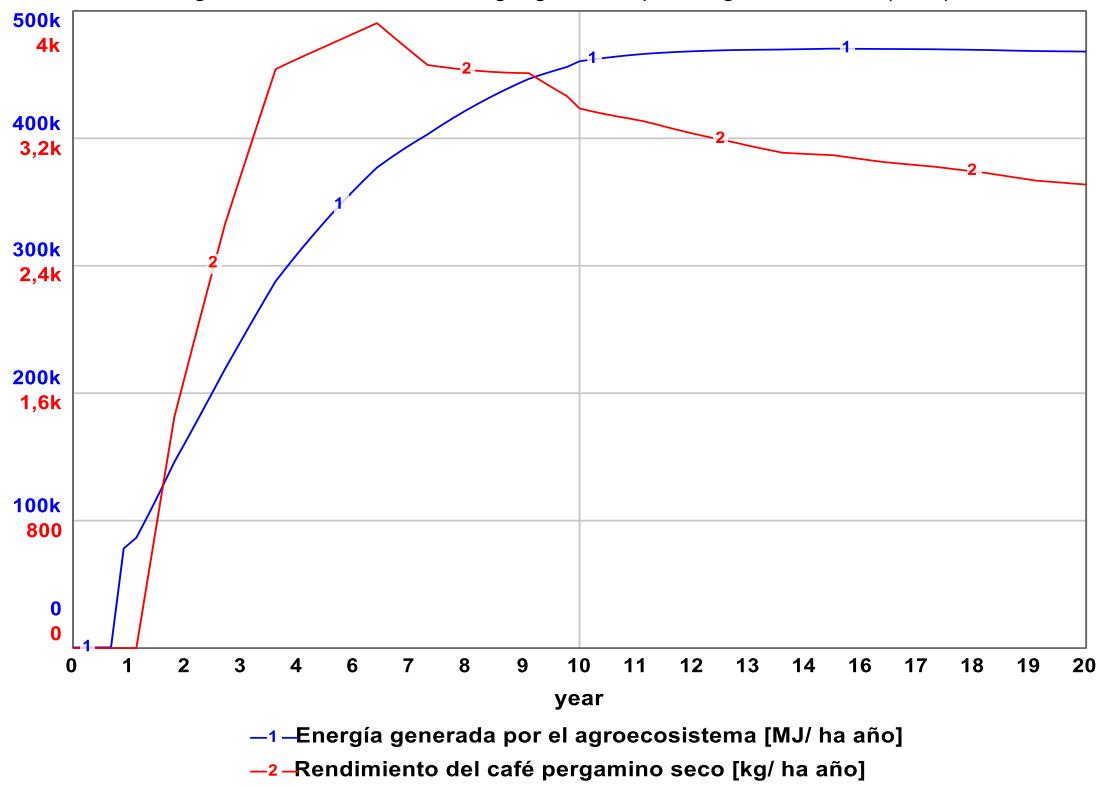
Figura 5-12. Modelación: estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV)



Fuente: autor (2018)

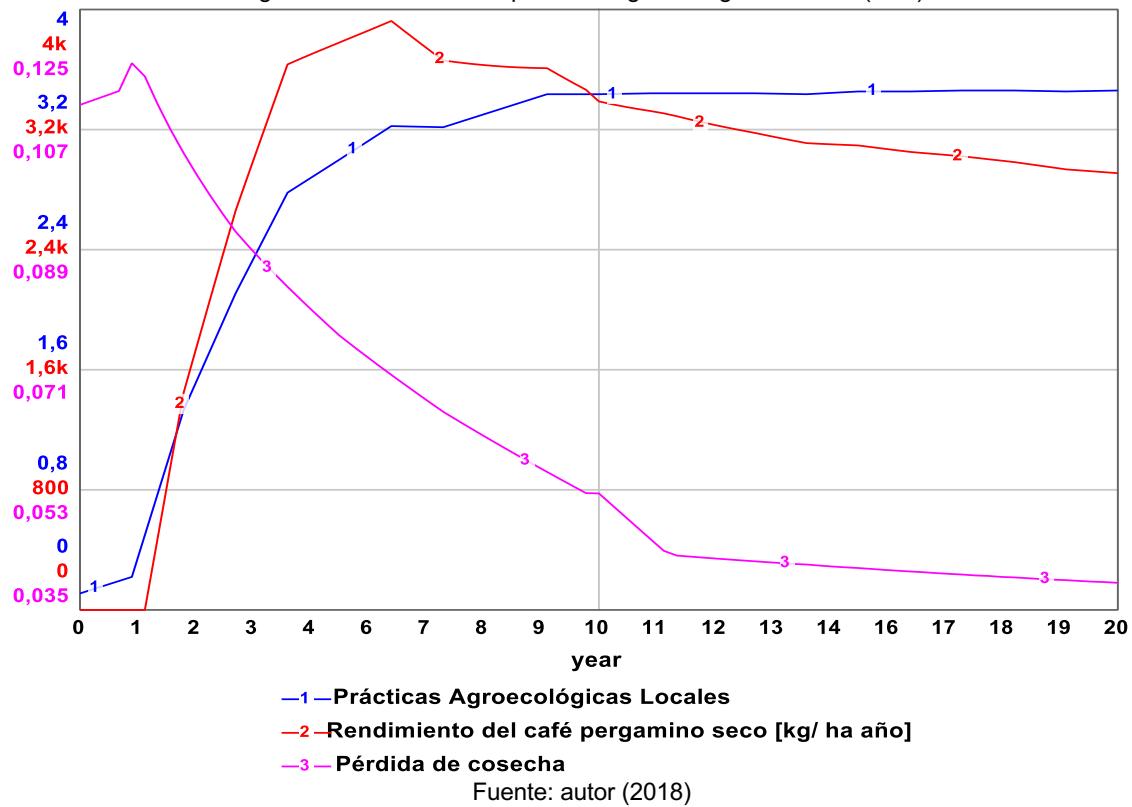
En la modelación del indicador energía generada por el agroecosistema (EGA) se determina el total de energía producida en MJ/ha-año derivada de fertilizantes orgánicos, leña, cisco, biogás y café pergamo seco (anexo D). La modelación arroja un total de 67168,8 MJ/ha para el año 1, aumentando hasta 196 395,22 MJ/ha en el año 3. El aumento de la energía generada coincide con la producción de café pergamo seco y sus subproductos, usados para generar fertilizantes orgánicos (humus de lombriz) y como fuente de energía (cisco, mucilago, leña). La energía generada aumenta con la producción de café pergamo seco hasta 473 830,34 MJ/ha en el año 10. La modelación desde al año 11 al año 20 estabiliza la energía generada en 460.000 MJ/ha-año (figura 5-13).

Figura 5-13. Modelación: energía generada por el agroecosistema (EGA)



Fuente: autor (2018)

Figura 5-14. Modelación: prácticas agroecológicas locales (PAL)



Fuente: autor (2018)

En la modelación el indicador prácticas agroecológicas locales (PAL) es calificado según las estrategias de conservación de la vida en el suelo (PCVS), cosecha de agua (PCA) y control biológico (PCV) implementadas en el agroecosistema. El indicador genera valores de 0,2 para el año 1 y mejora su desempeño en el tiempo, una vez se establece una producción constante que permite generar fertilizantes orgánicos, mejorar las condiciones de protección de suelos con cobertura vegetal, implementar estrategias de conservación de agua y estrategias de control biológico. El indicador obtiene un puntaje máximo de 3,4 en el año 10, la proyección al año 20 muestra una estabilización en un puntaje de 3,5. Un mejor puntaje en el indicador PAL reduce los valores del indicador pérdida de cosecha (PC) y mejora el indicador rendimiento de café pergamino seco (figura 5-14).

5.4.4 Dimensión económica

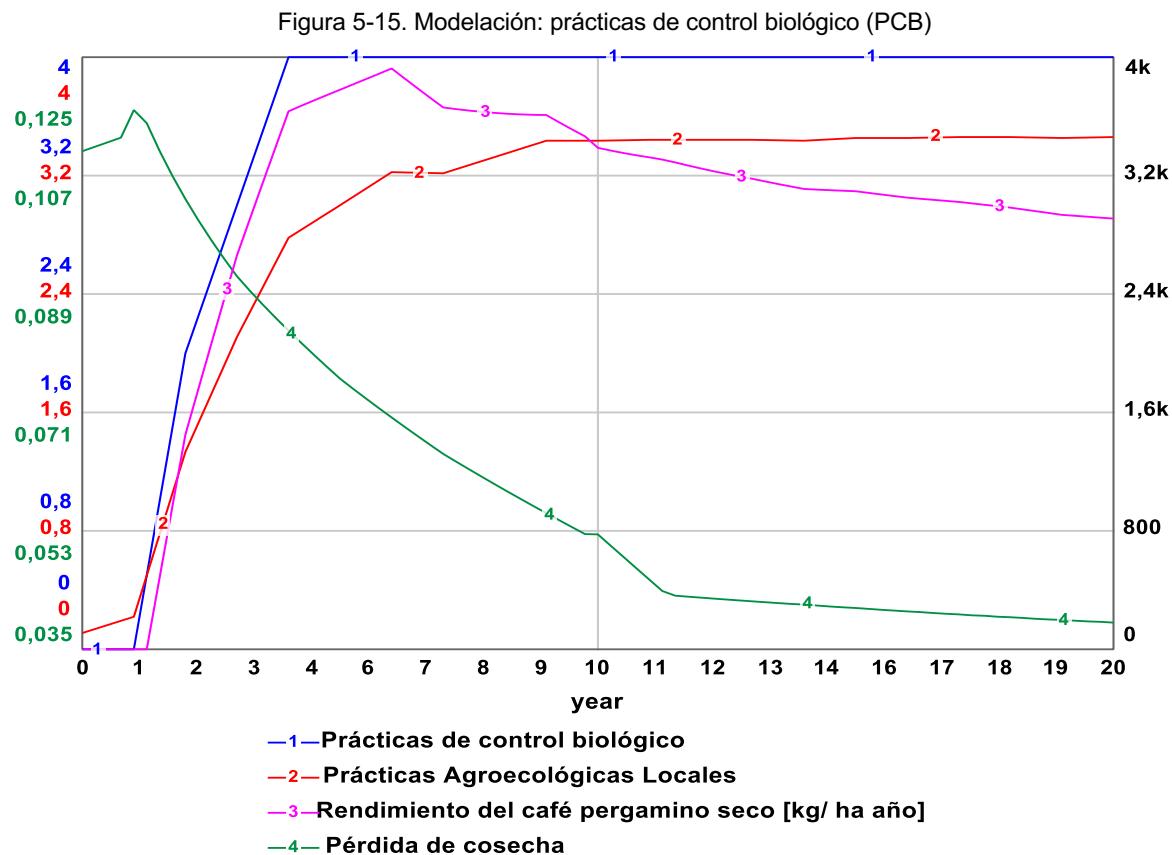
En la dimensión económica se valora la provisión de SE derivados de la aplicación del principio aumento de la productividad, mejorando la viabilidad económica del agroecosistema, conservando los procesos y las funciones ecosistémicas (PEcon-9), mediante los criterios CEcon-25, CEcon-26, CEcon-27 y CEcon-29. El criterio aumento de la eficiencia energética del agroecosistema generando un balance energético positivo (CEcon-25), se evalúa en la modelación por medio del indicador balance energético (BE). El criterio mantenimiento de la estabilidad en la producción de alimentos bajo condiciones cambiantes o de estrés, generadas por perturbaciones o eventos extremos (CEcon-26), se evalúa por medio del indicador rendimiento de los productos (RP). El criterio incremento de la diversificación de ingresos, la generación de productos secundarios y alternativas conexas a la actividad agropecuaria (CEcon-27), se evalúa por medio de los indicadores diversificación de ingresos (DI) y valorización de residuos (VR). El criterio aumento en el uso de insumos locales que aportan a la viabilidad económica del agroecosistema (CEcon-29), se evalúa por medio del indicador modelado prácticas de control biológico (PCB).

En la dimensión económica se evalúan los SE derivados de la aplicación del principio de reducción de la pobreza y mejora del bienestar humano en el agroecosistema sostenible, preservando los procesos y funciones ecosistémicas (PEcon-10), por medio de los criterios CEcon-30 y CEcon-31. El criterio Incremento de oportunidades de empleo y mejora de los ingresos de las comunidades beneficiarias de los agroecosistemas (CEcon-30), se evalúa por medio del indicador generación de empleo agrícola (GEA) y el criterio incremento del buen vivir, la buena salud humana, la recreación y el beneficio espiritual de las comunidades locales (CEcon-31), se evalúa en la modelación por medio del indicador calidad de vida (CV). En la modelación de la dimensión económica se incluyeron 7 indicadores, los resultados obtenidos y el comportamiento proyectado se describen a continuación:

El indicador prácticas de control biológico, es un indicador de la dimensión económica relacionado con el aumento de la productividad, mejorando la viabilidad económica del agroecosistema, conservando los procesos y las funciones ecosistémicas, mediante el uso de estrategias e insumos locales. En la modelación el indicador obtiene valores de 2 (año 3) derivado de la eliminación del uso de insecticidas y herbicidas. Posteriormente hacia el año 10 y en la proyección al año 20, el indicador obtiene valores de 4 derivados del sombrío, las prácticas para incentivar la presencia de insectos benéficos (nidos artificiales, aspersión de alimentos, plantas productoras de néctar), la diversificación mediante la implementación de cercas vivas y la manipulación de la vegetación adyacente. Además de estrategias como la implementación de trampas de captura de insectos plagas y la aplicación de bioplaguicidas (Acuna & Antonio, 2016).

El indicador PCB en la modelación influencia el comportamiento de las prácticas agroecológicas locales y el rendimiento del café pergamino seco. Una mayor incidencia de las prácticas de control

biológico, mejoran el desempeño de las PAL y el rendimiento del café pergamo seco, reduciendo las pérdidas de cosecha (figura 5-15).



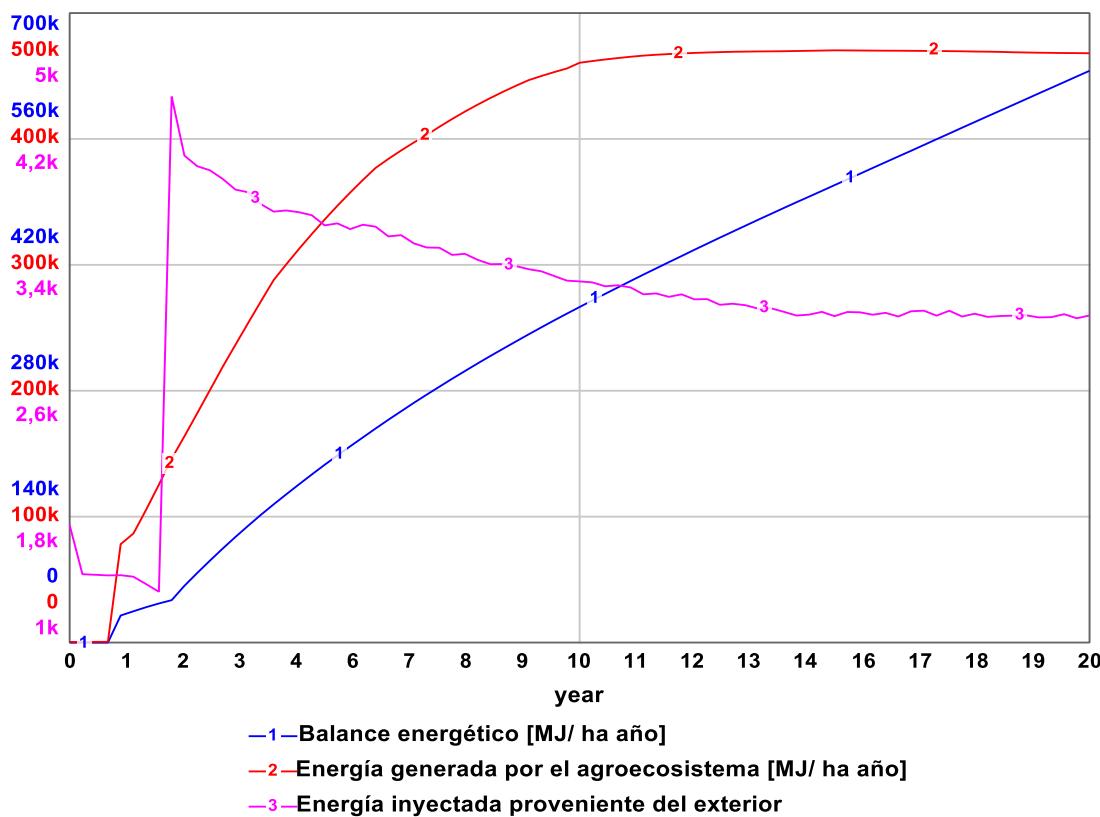
Fuente: autor (2018)

El indicador balance energético (BE) se determina por la diferencia entre la energía generada (EGA) y la energía inyectada al agroecosistema proveniente del exterior (EIAPE).

En la modelación el BE presenta un comportamiento negativo en el año 0 con -1329,27 MJ/ha-año, producto de una mayor cantidad de energía inyectada. El comportamiento del indicador presenta un balance positivo en el año 2 con 125057,78 MJ/ha-año, derivado de la producción de café pergamo seco, humus de lombriz, descomposición de hojarasca y la energía derivada de la producción de biogás y la utilización del cisco como combustible. En el año 10 se genera un balance positivo, incrementando hasta 470548,05 MJ/ha-año. La proyección del balance energético al año 20 indica un balance positivo en valores cercanos a 635000 MJ/ha-año (figura 5-16).

El indicador rendimiento de los productos (RP), determina rendimientos de 367 kg/ha-año (año 2) hasta 3654,54 kg/ha-año (año 10) del producto principal: café pergamo seco. La modelación desde al año 11 al año 20 arroja rendimientos entre 2900 kg/ha-año y 3300 kg/ha-año. La modelación incluye una renovación de los cafetales del 10% anual a partir del año 4. Sin embargo, la reducción en la producción del año 11 al año 20, sugiere que se debe implementar un mayor porcentaje anual de renovación de cafetales para mantener los rendimientos en los máximos alcanzados.

Figura 5-16. Modelación: balance energético (BE)



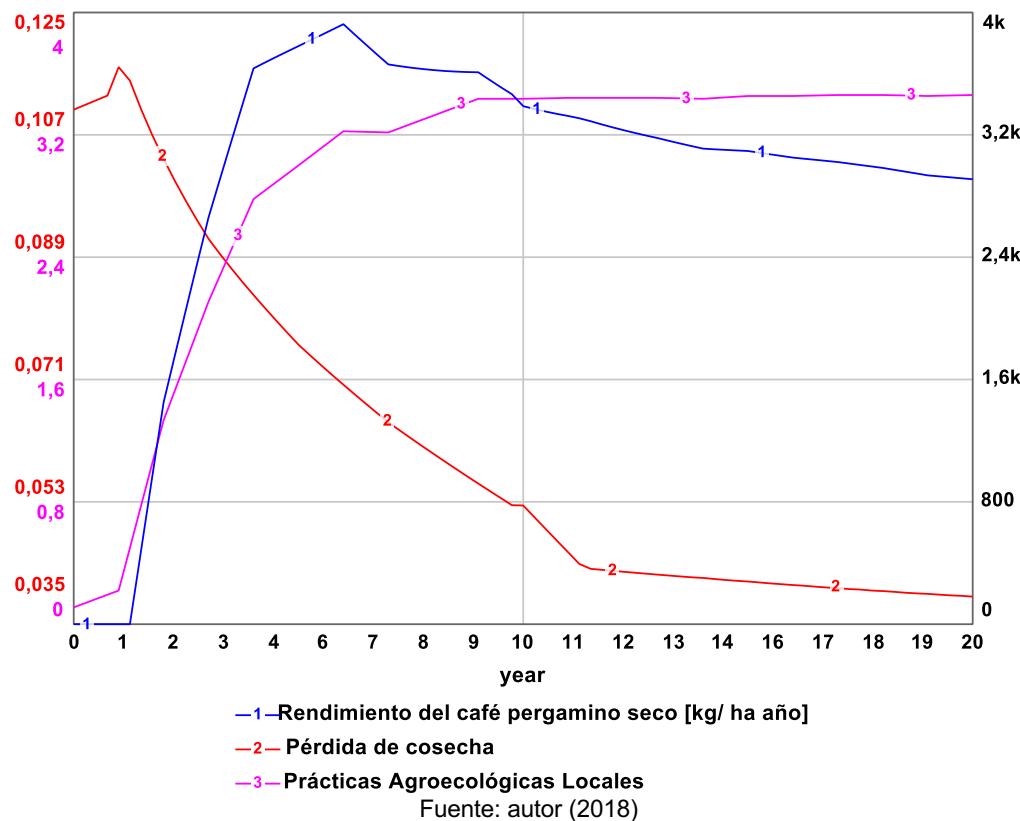
Fuente: autor (2018)

El rendimiento del cultivo principal para el agroecosistema modelado está influenciado por las prácticas agroecológicas locales (PAL) y las pérdidas de cosecha (PC). En la modelación las PAL contribuyen a reducir los porcentajes de pérdida de cosecha hasta un 6% en el año 10, reduciendo el porcentaje a 2% al año 20. Los mayores rendimientos se obtienen en el año 4, 5 y 6, donde las prácticas agroecológicas locales implementadas alcanzan un puntaje de 3,22 de un máximo de 4 puntos posibles (figura 5-17).

El indicador diversificación de ingresos (DI) modelado presenta un valor de 1 para el primer año, en el cual el agroecosistema no genera otros productos o cultivos. A partir del año 6 presenta un valor de 4, al contar con otros productos secundarios como leña, humus de lombriz, biogás y excedentes de autoconsumo que pueden ser comercializados, mejorando el desempeño del indicador DI.

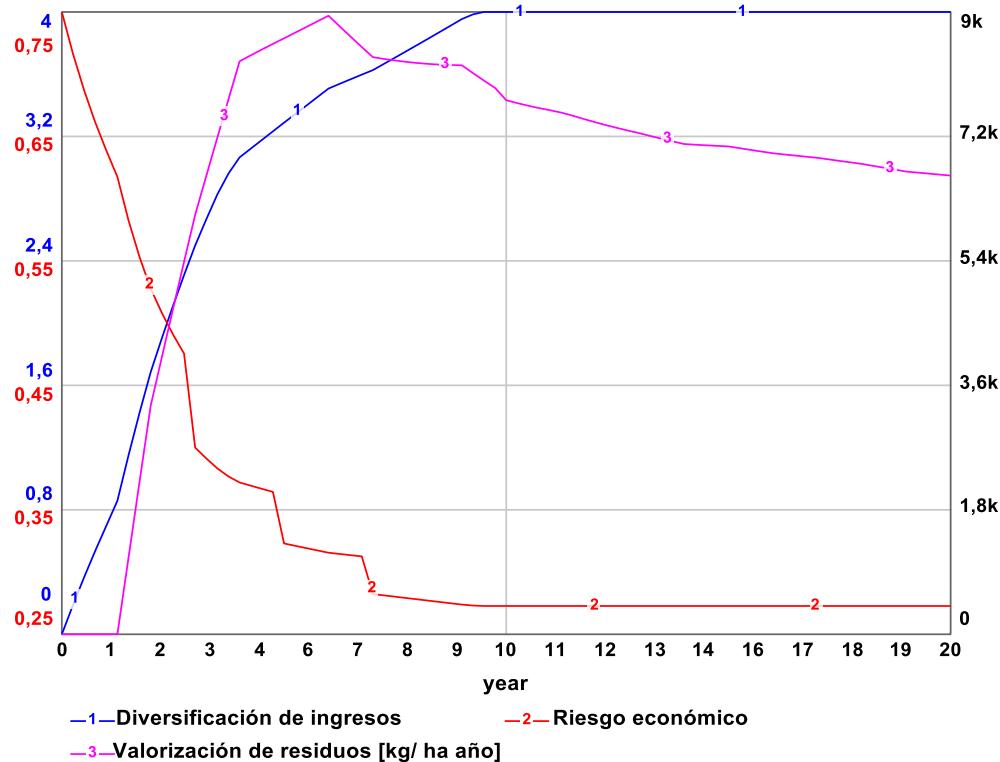
El modelo muestra una valorización de residuos (VR) para el año 2 de 734,00 Kg/ha-año de pulpa de café, 35,23 Kg/ha-año de mucilago y 67,53 Kg/ha-año de cisco, para un total de 836,76 Kg/ha-año de residuos procesados en la producción de humus de lombriz, biogás y energía para el proceso de secado. En el año 10 se generan 7309,08 Kg/ha-año de pulpa de café, 350,84 Kg/ha-año de mucilago, 672,44 Kg/ha-año de cisco, para un total de 8332,35 Kg/ha-año de residuos procesados (figura 5-18). La diversificación de ingresos reduce el riesgo económico, las posibles pérdidas de cosechas del producto principal pueden ser compensadas con la comercialización de otros productos generados en el agroecosistema.

Figura 5-17. Modelación: rendimiento del café pergaminio seco



Fuente: autor (2018)

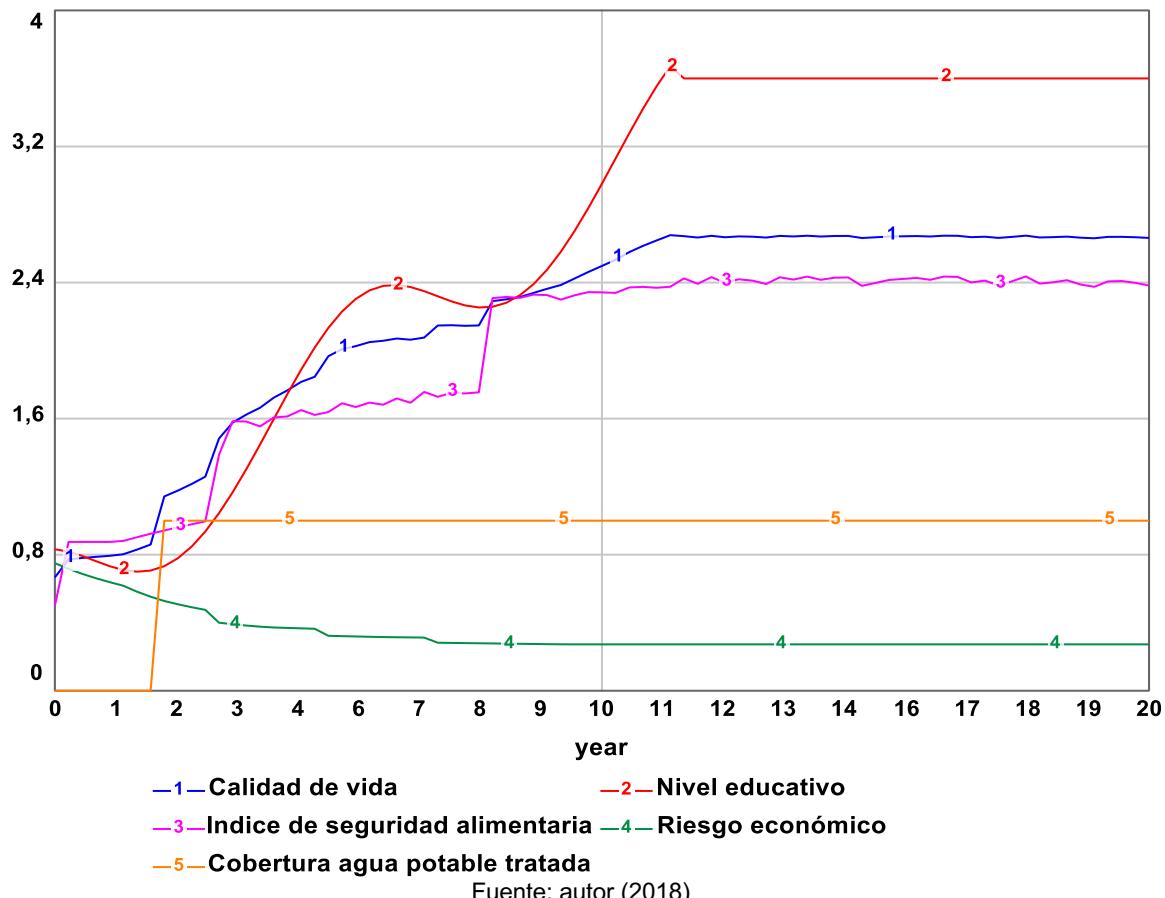
Figura 5-18. Modelación: diversificación de ingresos (DI)



Fuente: autor (2018)

El indicador generación de empleo agrícola (GEA) en la modelación reporta 21,95 jornales/ha para el año 2 hasta 218,56 jornales/ha en el año 10 equivalentes a 1,26 puestos de trabajo ha/año. Los jornales externos generados se deben a las actividades de recolección de café cereza. La calidad de vida en la modelación refleja valores crecientes desde el primer año, desde (0.8) hasta (2,5) en el año 10. Un puntaje mayor en la calidad de vida se traduce en mejores condiciones de nivel educativo (NE), índice de seguridad alimentaria (ISA), riesgo económico (RE) y acceso a agua potable (AAP) para el grupo familiar en el agroecosistema (figura 5-19).

Figura 5-19. Modelación: calidad de vida (CV)



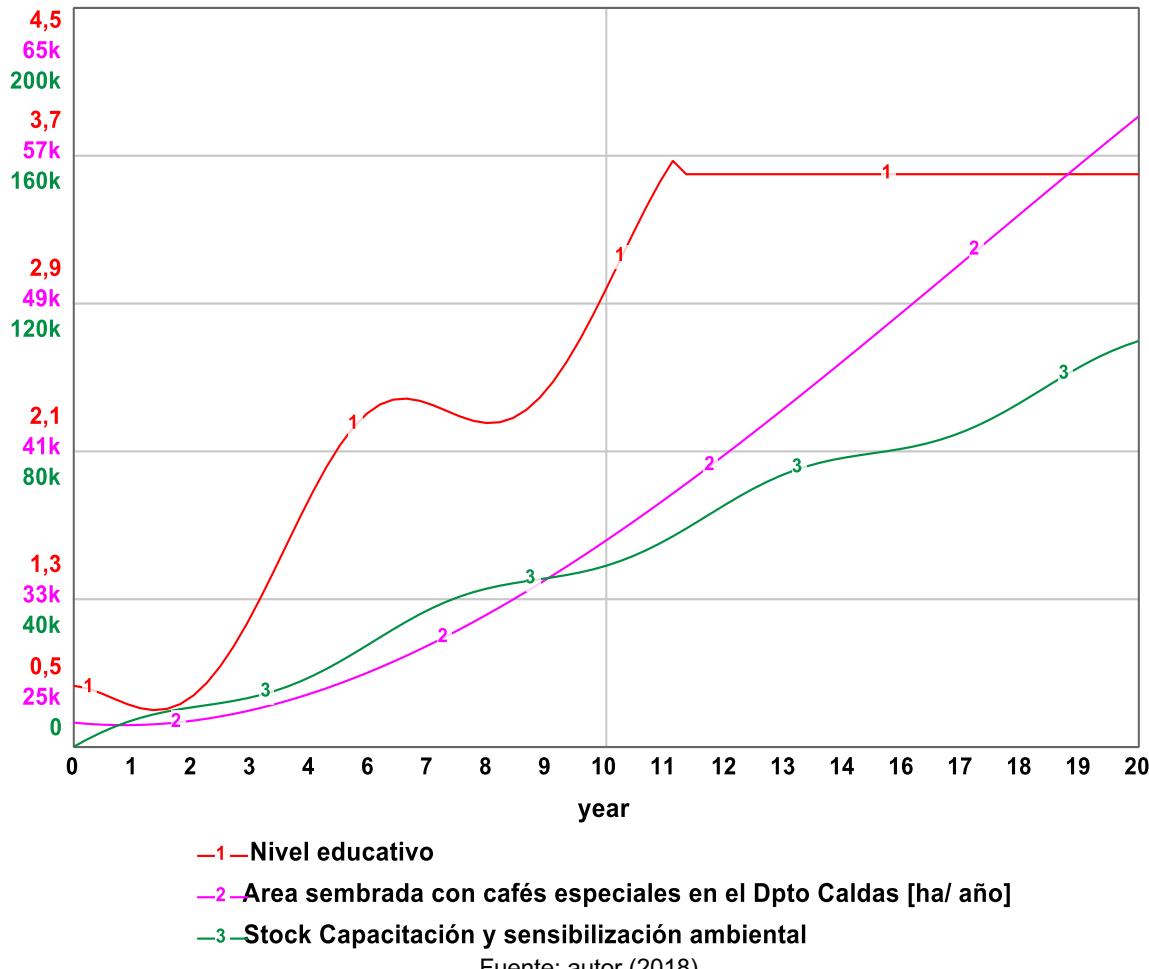
5.4.5 Dimensión política

En la dimensión se analizan los SE derivados de la aplicación del principio generación de políticas que promuevan la implementación de agroecosistemas sostenibles, conservando los procesos y funciones ecosistémicas (PPol-11) mediante los criterios CPol-32 y CPol-34. Particularmente para el agroecosistema tipo, sistema de café bajo sombra, los indicadores se relacionan con las políticas sectoriales que promueven el criterio generación e implementación de incentivos para la reconversión de sistemas agrícolas (CPol-32). Criterio evaluado mediante el indicador área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC).

El criterio implementación de políticas que promuevan el acceso y adopción de tecnologías de bajo costo adecuadas a las condiciones locales (CPol-34), se evalúa en la modelación mediante el indicador exógeno factor de acceso a crédito (AC). Para la dimensión política se analizan

además los SE relacionados con la aplicación del principio PPol-12: aumento de la investigación y la extensión agroecológica en los agroecosistemas sostenibles promoviendo el conocimiento local y la preservación de procesos y funciones ecosistémicas. El principio PPol-12 se evalúa por medio del criterio fomento del capital humano y la extensión agroecológica adaptada a las necesidades de las comunidades, asociaciones y redes (CPol-36). El criterio CPol-36 es analizado con los indicadores capacitación, sensibilización ambiental (CSA) y nivel educativo (NE). En la modelación de la dimensión política se incluyeron 4 indicadores, los resultados obtenidos y el comportamiento proyectado se describen a continuación:

Figura 5-20. Modelación: capacitación y sensibilización ambiental (CSA)



Fuente: autor (2018)

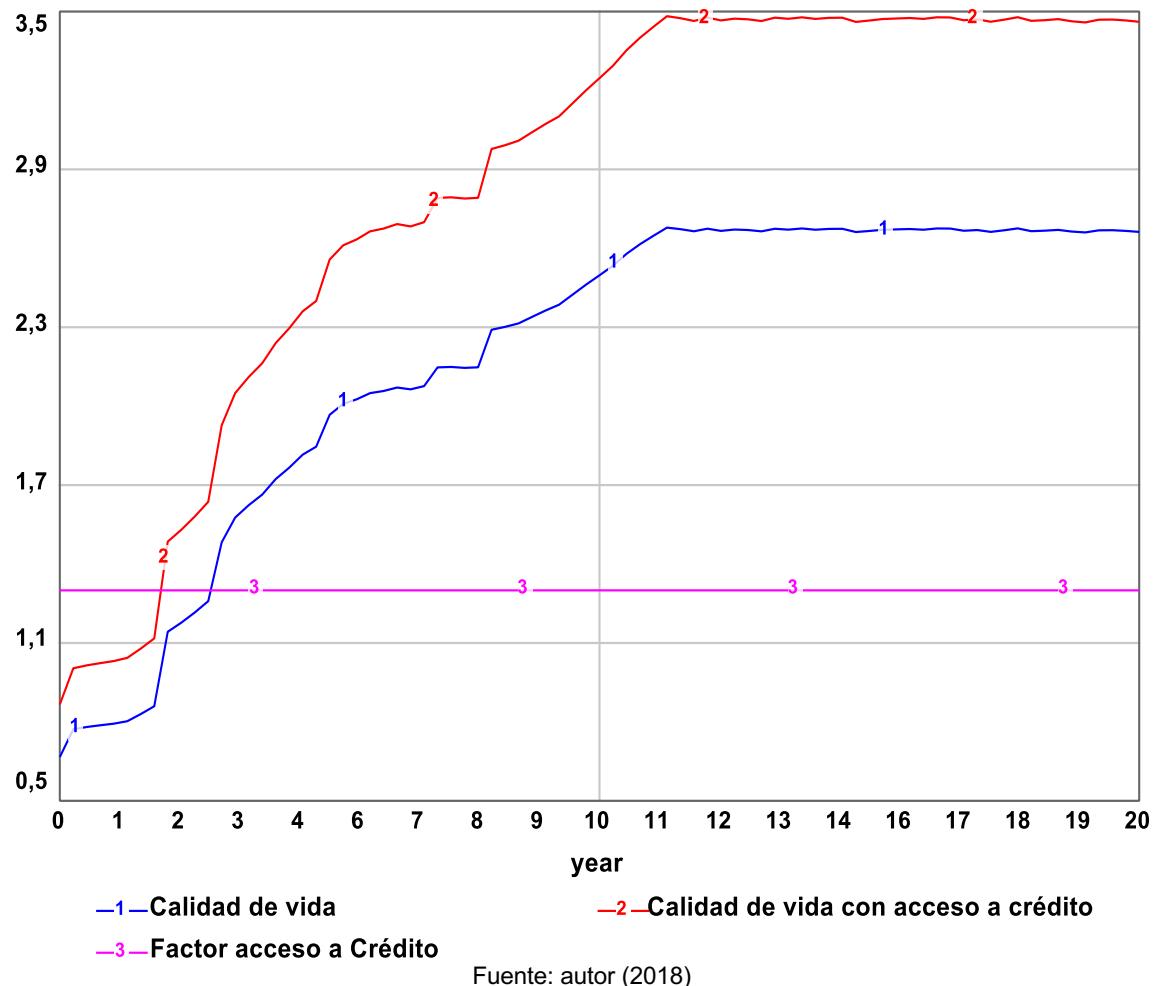
El indicador capacitación y sensibilización ambiental (CSA) refleja la cantidad anual de personas que reciben capacitación y sensibilización en temas ambientales por medio de gestiones administrativas y presupuestales de la Federación de Cafeteros de Caldas entre los años 2005 y 2017. La modelación refleja que el aumento del número de personas capacitadas se incrementa con el indicador área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC). El ASCEDC refleja un incremento desde el 0.30% (2003) hasta el 0,33% (2009) del total del área sembraba con café en el departamento. Por su parte, en la modelación el indicador CSA influencia el nivel educativo y la calidad de vida de los miembros del agroecosistema (figura 5-20).

El indicador nivel educativo (NE) muestra una mejora en el tiempo desde un 30% de los miembros de la unidad familiar con educación básica, secundaria o superior (año 1) hasta un máximo del

80% con educación básica, secundaria o superior (año 10). El indicador factor de acceso a crédito (AC) representa el nivel de impacto del crédito sobre la mejora de la calidad de vida de los productores de café en Colombia, se estima que el acceso a crédito impacta la calidad de vida en un 30% (Echavarría et al., 2016).

La calidad de vida con acceso a crédito en la modelación mejora los valores de 0,8 a 0,9 en el año 1 y de 2,5 a 3,3 en el año 10. El factor de acceso a crédito en el agroecosistema se traduce en mejores condiciones de nivel educativo (NE), índice de seguridad alimentaria (ISA), riesgo económico (RE) y acceso a agua potable (AAP) (figura 5-21).

Figura 5-21. Modelación: factor de acceso a crédito (AC)



Fuente: autor (2018)

5.4.6 Unidad de valor de SE – UVSE

La promoción de agroecosistemas que puedan proveer SE más allá de la producción de alimentos está mediada por el nivel de aporte de los SE al bienestar de las comunidades y la capacidad de las comunidades para advertirlo. Este aporte es fácilmente percibido cuando se trata de SE que tienen valor monetario como la provisión de alimentos y es más difícil de evidenciar cuando los SE no son transados en el mercado, como los SE de regulación del clima, preservación de hábitats, retención del suelo, entre otros (La-Roca, 2010).

La asignación de importancia, significación o valor a un SE generado en un agroecosistema, o su valoración, se convierte en un proceso supeditado al juicio o comprensión de un grupo humano, enmarcado en un contexto biofísico, sociopolítico, cultural y temporal particular (Martínez-Alier et al., 1998). Representar la importancia o valor de un SE en un lenguaje que sea común para una comunidad, lleva a la búsqueda de una unidad de medición del valor, o un patrón común. Diversos autores plantean la multidimensionalidad del valor, evitando reducirse a una única unidad de medida que los homogenice (De Groot et al., 2002; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Gómez-Bagethun & De Groot, 2007; Gómez-Bagethun & De Groot, 2010; Kumar, 2010; Segura & Aguilar, 2016).

En esta investigación doctoral, se propone una unidad de valor de servicio ecosistémico (UVSE) multidimensional: ecológica, sociocultural, política, tecnológica y económica. UVSE que permite relacionar los indicadores de valoración con los SE que se valoran.

La relación de la UVSE con el marco de valoración propuesto en el capítulo 2, parte de la premisa que, al identificar y medir un SE en el agroecosistema, intrínsecamente se está reconociendo su importancia o valor. Posteriormente, el valor multidimensional: ecológico, sociocultural, económico, tecnológico y político (numeral 1.3), se desarrolla mediante una serie de principios, criterios e indicadores de valoración.

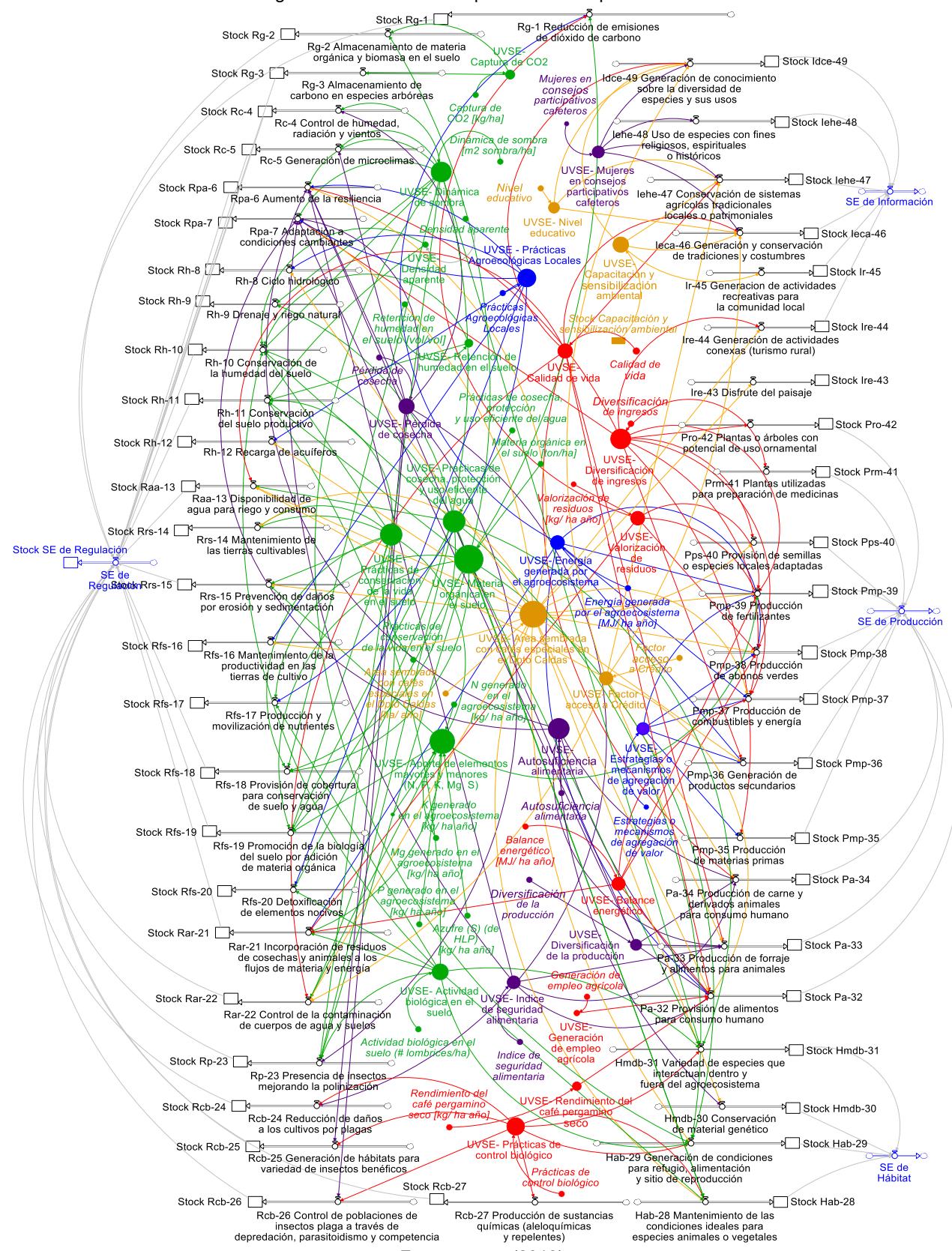
Los principios y criterios se encuentran interrelacionados de manera que, al aplicar un principio o un criterio en el agroecosistema, se potencian en mayor o menor medida las funciones y servicios ecosistémicos relacionados (anexo A). Los indicadores de valoración de SE son expresiones cualitativas o cuantitativas observables que relacionan una o más variables, permitiendo medir la aplicación de los criterios. La relación entre los indicadores y los SE que valoran se presenta en el numeral 4.2, los detalles de cálculo se especifican en los anexos C y D.

Debido a que los indicadores presentan unidades de medición diferentes, cada uno de ellos fue normalizado para establecer un aporte unitario cada vez que el indicador reporta una magnitud. El aporte se denomina unidad de valor de servicio ecosistémico (UVSE). En otras palabras, si el indicador reporta un valor diferente de cero, su aporte en UVSE es uno (1) durante el año analizado.

Posteriormente, se realiza la sumatoria de los aportes que los indicadores de diferentes dimensiones hacen al SE que se valora. La sumatoria se almacena en el modelo dinámico en el “stock de UVSE” que permite realizar comparaciones entre los stocks de los diferentes SE valorados. Mediante el cálculo de la UVSE se evidencia el valor multidimensional y se identifican los SE con mayor valor en el agroecosistema. La UVSE permite identificar los SE sobre los cuales deben implementarse acciones para mejorar su valoración.

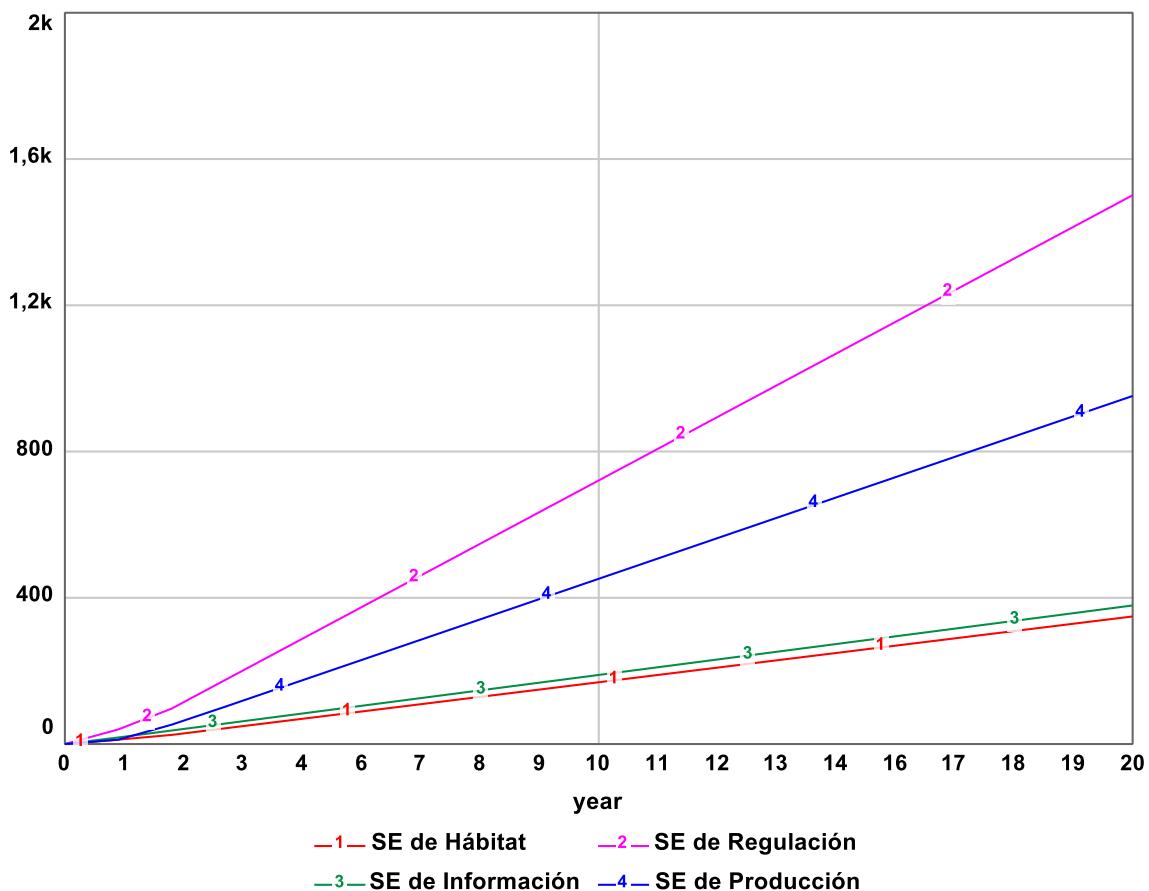
La aproximación de la UVSE está limitada por los indicadores con datos en series de tiempo para el agroecosistema que se analiza. La generación de datos en series de tiempo se identifica como una oportunidad de investigación para cuantificar indicadores relevantes y valorar SE de interés. Derivado de la modelación de la UVSE por indicador para el agroecosistema tipo analizado (figura 5-22), se realiza el análisis de los SE de regulación, producción, hábitat e información valorados.

Figura 5-22. Modelación: aporte de UVSE por indicador



La modelación determina que en el agroecosistema tipo (café bajo sombra) las funciones de regulación presentan una mayor valoración con 1480 UVSE en al año 20. Por su parte las funciones de producción reflejan 940 UVSE, las funciones de hábitat 345 UVSE y las funciones de información 374 UVSE (figura 5-23).

Figura 5-23. UVSE: funciones de regulación, producción, hábitat e información



Fuente: autor (2018)

Las decisiones en el diseño y manejo del agroecosistema involucran la implementación de prácticas agroecológicas locales. Prácticas que valoran la provisión de SE relacionados con las funciones de regulación asociadas a: el control de humedad, la radiación y vientos, la generación de microclimas, la conservación de la humedad del suelo, la conservación del suelo productivo, la disponibilidad de agua para riego y consumo, la provisión y movilización de nutrientes, la incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía, el control de la contaminación de cuerpos de agua, y el control de poblaciones de insectos plaga. SE que finalmente mejoran la adaptación del agroecosistema a condiciones cambiantes.

Dentro de las funciones de producción se valora la provisión de alimentos para consumo humano, la producción de forraje y alimentos para animales y la producción de carne y derivados animales, SE que mejoran la autosuficiencia alimentaria y el índice de seguridad alimentaria. Se valora la provisión de SE relacionados con la producción de materias primas, la generación de productos secundarios y la producción de combustibles, energía y abonos. SE que mejoran las estrategias de agregación de valor, la diversificación de ingresos y la energía generada por el agroecosistema.

Las funciones de hábitat valoradas en el agroecosistema tipo, incluyen la provisión de SE relacionados con el mantenimiento de las condiciones ideales para especies animales o vegetales en el agroecosistema. Condiciones requeridas por las especies cultivadas, aprovechadas y para las especies deseables mediante la generación de condiciones para refugio, alimentación, sitio de reproducción y la conservación de material genético de especies locales, variedades de cultivos y animales adaptados localmente. Las condiciones óptimas mantienen una variedad de especies que interactúan dentro y fuera del agroecosistema, para el caso del café bajo sombra se valoran especialmente las especies de aves e insectos polinizadores.

Las funciones de información valoradas se relacionan con el disfrute del paisaje, mediante la generación de actividades conexas a la actividad agrícola como el turismo rural de gran aceptación en el paisaje cultural cafetero. Identidad cafetera que promueve la conservación de los sistemas agrícolas locales, la conservación de tradiciones, costumbres y el conocimiento sobre la diversidad, las especies locales y sus usos.

El análisis de los resultados individuales refleja como SE más valorados en el agroecosistema café bajo sombra al final del año 20 son los siguientes: aumento de la resiliencia del agroecosistema (Rpa-6) y adaptación a condiciones cambiantes (Rpa-7) con 153 UVSE, conservación de la humedad del suelo (Rh-10) con 137 UVSE, conservación del suelo productivo (Rh-11) con 99 UVSE, presencia de insectos mejorando la polinización de los cultivos (Rp-23) con 98 UVSE, control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos (Rar-22) con 97 UVSE, promoción de la biología del suelo por adición de materia orgánica y excreciones radiculares (Rfs-19) con 95 UVSE, incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21) con 94 UVSE, provisión de cobertura para conservación de suelo y agua (Rfs-18) con 77 UVSE, producción y movilización de nutrientes (Rfs-17) y detoxificación de elementos nocivos (Rfs-20) con 60 UVSE.

Los SE con mayor valoración son consecuencia de la implementación de una mayor diversidad en el agroecosistema. Diversidad derivada de la inclusión de especies arbóreas para sombrío, las prácticas agroecológicas locales, la inclusión de especies para mejorar la autosuficiencia alimentaria, la diversificación en la producción mediante productos secundarios y la transformación de residuos. Aspectos que mejoran la capacidad del agroecosistema para adaptarse a condiciones cambiantes generadas por eventos extremos (Harris, 2003; Altieri, 2013).

Los SE con menores puntajes de UVSE al final del año 20 son: producción de sustancias químicas para estimular componentes deseados y suprimir componentes indeseables (sustancias aleloquímicas, repelentes, etc.) (Rcb-27) con 18 UVSE, almacenamiento de carbono en especies arbóreas del agroecosistema (Rg-3) con 19 UVSE, plantas o árboles con potencial de uso ornamental (Pro-42) con 19 UVSE, disfrute del paisaje (Ire-43) y uso de especies con fines religiosos, espirituales o históricos (Iehe-48) con 20 UVSE.

Dentro de los SE con mejor stock de UVSE al final del año 20 se destaca el almacenamiento de carbono en especies arbóreas (Rg-3) con 19 UVSE. SE derivado de la implementación de árboles para sombrío que no es valorado directamente por la mayoría de los indicadores incluidos en la modelación. Sin embargo, al incluir la captura de carbono como un SE que contribuya a la diversificación de ingresos en el agroecosistema, se relacionaría con un mayor número de indicadores obteniendo una mejor valoración al final del año 20. Los SE de información (Ire-43, Iehe-48) presentan una menor valoración, ya que las especies implementadas en el agroecosistema modelado están orientadas a la producción de alimentos para consumo humano

y la generación de productos secundarios, su valoración espiritual e histórica no está relacionada directamente con los indicadores modelados.

La modelación identifica un cambio en la valoración de SE durante los tres (3) primeros años. Los cambios en la valoración están relacionados con la productividad del cultivo principal que presenta rendimientos ascendentes desde el año 2 hasta el año 4, con un máximo de 4177 kg/ha de café pergamino seco. Valorando en mayor medida SE como la conservación del suelo productivo, el control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos, la presencia de insectos mejorando la polinización de los cultivos, la promoción de la biología del suelo por adición de materia orgánica y la incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía.

5.4.6.1 Valoración de SE de regulación

Derivado de la modelación y de las ecuaciones generadas para establecer el stock de UVSE para cada uno de los 49 SE en agroecosistemas sostenibles (AS) identificados en la capítulo 1, se observa que los indicadores con mayor aporte en UVSE a las funciones de regulación son: áreas con agroecosistemas sostenibles, analizadas en la modelación mediante la variación en el tiempo de las áreas sembradas con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC). El incremento en los AS en el departamento aumenta la provisión a nivel local y regional de SE de regulación del ciclo hidrológico (Rh-8) al mejorar la disponibilidad de agua para riego y consumo (Raa-13) manteniendo las tierras cultivables (Rrs-14) y la productividad (Rfs-16). Igualmente, el incremento de los AS contribuye a reducir los daños por erosión, sedimentación (Rrs-15) y controlar la contaminación de cuerpos de agua y suelos (Rar-22).

La dinámica de sombra (DS) manejada en el agroecosistema tipo mediante la integración del componente arbóreo y el aporte de materia orgánica al suelo (MOs) valoran la provisión de SE de regulación. La cobertura generada por la sombra y la materia orgánica, conservan el agua y el suelo (Rfs-18) controlan la humedad, la radiación y los vientos (Rc-4) mejoran la disponibilidad de agua (Rh-10) y las condiciones de drenaje y riego natural (Rh-9). El follaje de los árboles implementados aporta de manera constante materia orgánica (Rfs-19) que incide en la conservación de la humedad y en la generación de condiciones para mejorar la actividad biológica en el suelo (Abs) mediante la producción y movilización de nutrientes (Rfs-17) y la incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21). Los indicadores y las ecuaciones por medio de las cuales se aportan UVSE a los SE de regulación se especifican en la tabla 5-9.

Tabla 5-9. Modelo formal: servicios ecosistémicos de regulación valorados

UVSE= Unidad de valor de servicio ecosistémico.

Indicadores dimensión ecológica: dinámica media de sombra (DS), prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA), materia orgánica en el suelo (MOs), densidad aparente (DA), retención de humedad en el suelo (RHs), actividad biológica en el suelo (Abs), aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S), prácticas de conservación de la vida en el suelo (PCVS, captura de CO₂ (CDC).

Dimensión sociocultural: pérdida de cosechas (PC), autosuficiencia alimentaria (AsA), índice de seguridad alimentaria (ISA), diversificación de la producción (A1), participación de mujeres en concejos comunitarios (MCP).

Dimensión tecnológica: estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV), energía generada por el agroecosistema (EGA), prácticas agroecológicas locales (PAL).

Dimensión económica: prácticas de control biológico (PCB), balance energético (BE), rendimiento de los productos (RP), diversificación de ingresos (DI), valorización de residuos (VR), generación de empleo agrícola (GEA), calidad de vida (CV).

Dimensión política: capacitación y sensibilización ambiental (CSA), nivel educativo (NE), factor de acceso a crédito (AC), área con agroecosistemas sostenibles: área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC).

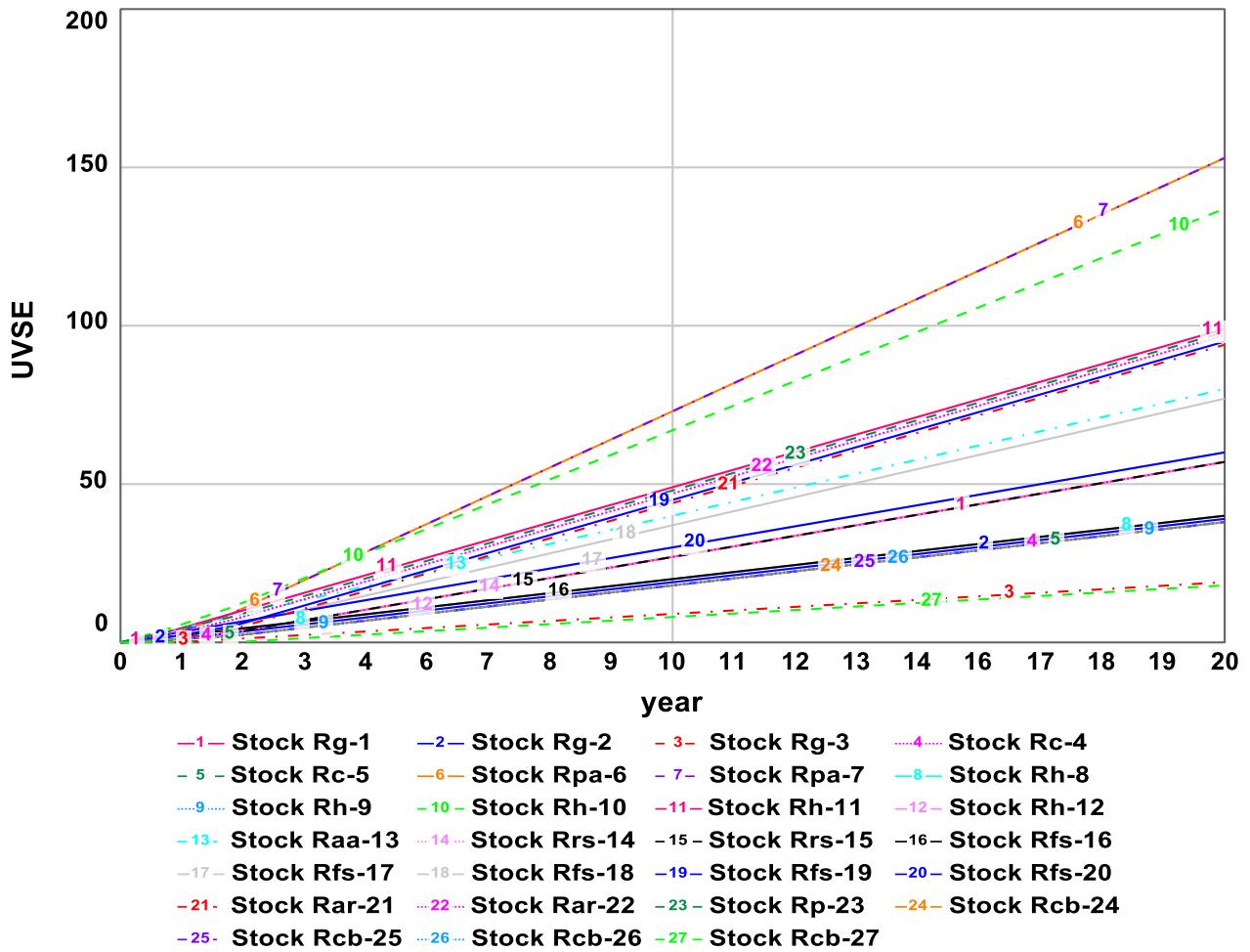
SE valorados	Ecuación (indicadores por medio de los cuales se valora el SE)
Rg-1: reducción de emisiones de dióxido de carbono	$\text{Stock}_{\text{Rg}_1}(t) = \text{Stock}_{\text{Rg}_1}(t - dt) + (Rg_1) dt$ $Rg_1(dt) = UVSE_MOs + UVSE_EGA + UVSE_VR$

SE valorados	Ecuación (indicadores por medio de los cuales se valora el SE)
Rg-2: almacenamiento de materia orgánica y biomasa en el suelo	$Stock_{Rg_2}(t) = Stock_{Rg_2}(t - dt) + (Rg_2) dt$ $Rg_2(dt) = UVSE_MOS + UVSE_CDC$
Rg-3: almacenamiento de carbono en especies arbóreas	$Stock_{Rg_3}(t) = Stock_{Rg_3}(t - dt) + (Rg_3) dt$ $Rg_3(dt) = UVSE_CDCCarb + UVSE_CDCcaf + UVSE_MOs$
Rc-4: control de humedad, radiación y vientos	$Stock_{Rc_4}(t) = Stock_{Rc_4}(t - dt) + (Rc_4) dt$ $Rc_4(dt) = UVSE_DS + UVSE_PC$
Rc-5: generación de microclimas	$Stock_{Rc_5}(t) = Stock_{Rc_5}(t - dt) + (Rc_5) dt$ $Rc_5(dt) = UVSE_DS + UVSE_PC$
Rpa-6: aumento de la resiliencia	$Stock_{Rpa_6}(t) = Stock_{Rpa_6}(t - dt) + (Rpa_6) dt$ $Rpa_6(dt) = UVSE_DS + UVSE_PAL + UVSE_PC + UVSE_AsA + UVSE_ISA + UVSE_DI + UVSE_ASCEDC + UVSE_A1$
Rpa-7: adaptación a condiciones cambiantes	$Stock_{Rpa_7}(t) = Stock_{Rpa_7}(t - dt) + (Rpa_7) dt$ $Rpa_7(dt) = UVSE_DS + UVSE_PAL + UVSE_PC + UVSE_AsA + UVSE_ISA + UVSE_DI + UVSE_ASCEDC + UVSE_A1$
Rh-8: ciclo hidrológico	$Stock_{Rh_8}(t) = Stock_{Rh_8}(t - dt) + (Rh_8) dt$ $Rh_8(dt) = UVSE_PAL + UVSE_ACEDC$
Rh-9: drenaje y riego natural	$Stock_{Rh_9}(t) = Stock_{Rh_9}(t - dt) + (Rh_9) dt$ $Rh_9(dt) = UVSE_PCA + UVSE_DS$
Rh-10: conservación de la humedad del suelo	$Stock_{Rh_10}(t) = Stock_{Rh_10}(t - dt) + (Rh_10) dt$ $Rh_10(dt) = UVSE_DS + UVSE_PCA + UVSE_MOs + UVSE_DA + UVSE_RHs + UVSE_Abs + UVSE_PCVS$
Rh-11: conservación del suelo productivo	$Stock_{Rh_11}(t) = Stock_{Rh_11}(t - dt) + (Rh_11) dt$ $Rh_11(dt) = UVSE_MOs + UVSE_DS + UVSE_RHs + UVSE_Abs + UVSE_PCVS$
Rh-12: recarga acuíferos	$Stock_{Rh_12}(t) = Stock_{Rh_12}(t - dt) + (Rh_12) dt$ $Rh_12(dt) = UVSE_PAL + UVSE_ACEDC$
Raa-13: disponibilidad de agua para riego y consumo	$Stock_{Raa_13}(t) = Stock_{Raa_13}(t - dt) + (Raa_13) dt$ $Raa13(dt) = UVSE_PCA + UVSE_CV + UVSE_ASCEDC + UVSE_AC$
Rrs-14: mantenimiento de las tierras cultivables	$Stock_{Rrs_14}(t) = Stock_{Rrs_14}(t - dt) + (Rrs_14) dt$ $Rrs_14(dt) = UVSE_PCVS + UVSE_N, P, K, Mg, S + UVSE_ASCEDC$
Rrs-15: prevención de daños por erosión y sedimentación	$Stock_{Rrs_15}(t) = Stock_{Rrs_15}(t - dt) + (Rrs_15) dt$ $Rrs_15(dt) = UVSE_PCVS + UVSE_N, P, K, Mg, S + UVSE_ASCEDC$
Rfs-16: mantenimiento de la productividad en las tierras de cultivo	$Stock_{Rfs_16}(t) = Stock_{Rfs_16}(t - dt) + (Rfs_16) dt$ $Rfs_16(dt) = UVSE_PAL + UVSE_ACEDC$
Rfs-17: producción y movilización de nutrientes (micorrizas, fijación de nitrógeno, etc.)	$Stock_{Rfs_17}(t) = Stock_{Rfs_17}(t - dt) + (Rfs_17) dt$ $Rfs_17(dt) = UVSE_PAL + UVSE_MOs + UVSE_Abs$
Rfs-18: provisión de cobertura para conservación de suelo y agua	$Stock_{Rfs_18}(t) = Stock_{Rfs_18}(t - dt) + (Rfs_18) dt$ $Rfs_18(dt) = UVSE_MOs + UVSE_PCVS + UVSE_DS + UVSE_PCA$
Rfs-19: promoción de la biología del suelo por adición de materia orgánica	$Stock_{Rfs_19}(t) = Stock_{Rfs_19}(t - dt) + (Rfs_19) dt$ $Rfs_19(dt) = UVSE_MOs + UVSE_PCVS + UVSE_N, P, K, Mg, S + UVSE_DS + UVSE_PCA$
Rfs-20: detoxificación de elementos nocivos	$Stock_{Rfs_20}(t) = Stock_{Rfs_20}(t - dt) + (Rfs_20) dt$ $Rfs_20(dt) = UVSE_PAL + UVSE_MOs + UVSE_Abs$
Rar-21: incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía	$Stock_{Rar_21}(t) = Stock_{Rar_21}(t - dt) + (Rar_21) dt$ $Rar_21(dt) = UVSE_Abs + UVSE_N, P, K, Mg, S + UVSE_EGA + UVSE_BE + UVSE_VR$
Rar-22: control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos	$Stock_{Rar_22}(t) = Stock_{Rar_22}(t - dt) + (Rar_22) dt$ $Rar_22(dt) = UVSE_PCVS + UVSE_N, P, K, Mg, S + UVSE_CV + UVSE_ASCEDC + UVSE_AC$

SE valorados	Ecuación (indicadores por medio de los cuales se valora el SE)
Rp-23: presencia de insectos mejorando la polinización	$Stock_{Rp_23}(t) = Stock_{Rp_23}(t - dt) + (Rp_23) dt$ $Rp_23(dt) = UVSE_PC + UVSE_PCS + UVSE_MOs + UVSE_Abs + UVSE_DS$
Rcb-24: reducción de daños a los cultivos por plagas	$Stock_{Rcb_24}(t) = Stock_{Rcb_24}(t - dt) + (Rcb_24) dt$ $Rcb_24(dt) = UVSE_PC + UVSE_PCB$
Rcb-25: generación de hábitats para variedad de insectos benéficos	$Stock_{Rcb_25}(t) = Stock_{Rcb_25}(t - dt) + (Rcb_25) dt$ $Rcb_25(dt) = UVSE_PC + UVSE_PCB$
Rcb-26: control de poblaciones de insectos plaga a través de depredación, parasitoidismo y competencia	$Stock_{Rcb_26}(t) = Stock_{Rcb_26}(t - dt) + (Rcb_26) dt$ $Rcb_26(dt) = UVSE_PC + UVSE_PCB$
Rcb-27: producción de sustancias químicas (aleloquímicas y repelentes)	$Stock_{Rcb_27}(t) = Stock_{Rcb_27}(t - dt) + (Rcb_27) dt$ $Rcb_27(dt) = UVSE_PCB$

Fuente: autor (2018)

Figura 5-24. UVSE: funciones de regulación



Fuente: autor (2018)

Las funciones de regulación incluyen un total de 27 servicios ecosistémicos (SE), la modelación al año 20 de establecido el agroecosistema, refleja que los SE con mayor Stock en unidades de valor de servicio ecosistémico (UVSE) derivadas del análisis de los indicadores para las dimensiones ecológica, sociocultural, tecnológica, económica y política son: el aumento de la

resiliencia del agroecosistema (Rpa-6) y la adaptación a condiciones cambiantes (Rpa-7) con 153 UVSE, seguidos de la conservación de la humedad del suelo (Rh-10) con 137 UVSE, conservación del suelo productivo (Rh-11) con 99 UVSE, presencia de insectos mejorando la polinización de los cultivos (Rp-23) con 98 UVSE, control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos (Rar-22) con 97 UVSE, promoción de la biología del suelo por adición de materia orgánica y excreciones radiculares (Rfs-19) con 95 UVSE e incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía (Rar-21) con 94 UVSE (figura 5-24). La implementación de principios y criterios para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles y su medición mediante los indicadores establecidos en la modelación, refleja como el agroecosistema modelado, mejora en el tiempo atributos como productividad, estabilidad, viabilidad, adaptabilidad, equidad, autosuficiencia y resiliencia y los SE relacionados.

5.4.6.2 Valoración de SE de hábitat

La modelación determina que los indicadores que aportan en mayor medida al stock de UVSE de las funciones de hábitat son la dinámica de sombra (DS) y las prácticas agroecológicas. La inclusión del componente arbóreo genera condiciones de refugio, alimentación y sitio de reproducción (Hab-28, Hab-29) aumentando la variedad de plantas, animales e insectos que interactúan dentro y fuera del agroecosistema (Hmdb-31) y conservando el material genético (Hmdb-30) de las especies cultivadas y colonizadoras.

Los indicadores prácticas agroecológicas de control biológico (PCB), prácticas de cosecha, uso eficiente de agua (PCA) y adición de materia orgánica al suelo (MOs) aportan a la valoración de las funciones de hábitat dentro del agroecosistema modelado. Los indicadores y las ecuaciones por medio de las cuales se aporta UVSE a los SE de hábitat se especifican en la tabla 5-10.

Tabla 5-10. Modelo formal: servicios ecosistémicos de hábitat valorados

UVSE= Unidad de valor de servicio ecosistémico.

Indicadores dimensión ecológica: dinámica media de sombra (DS), prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA), materia orgánica en el suelo (MOs), densidad aparente (DA), retención de humedad en el suelo (RHs), actividad biológica en el suelo (Abs), aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S), prácticas de conservación de la vida en el suelo (PCVS, captura de CO₂ (CDC).

Dimensión sociocultural: pérdida de cosechas (PC), autosuficiencia alimentaria (AsA), índice de seguridad alimentaria (ISA), diversificación de la producción (A1), participación de mujeres en concejos comunitarios (MCP).

Dimensión tecnológica: estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV), energía generada por el agroecosistema (EGA), prácticas agroecológicas locales (PAL).

Dimensión económica: prácticas de control biológico (PCB), balance energético (BE), rendimiento de los productos (RP), diversificación de ingresos (DI), valorización de residuos (VR), generación de empleo agrícola (GEA), calidad de vida (CV).

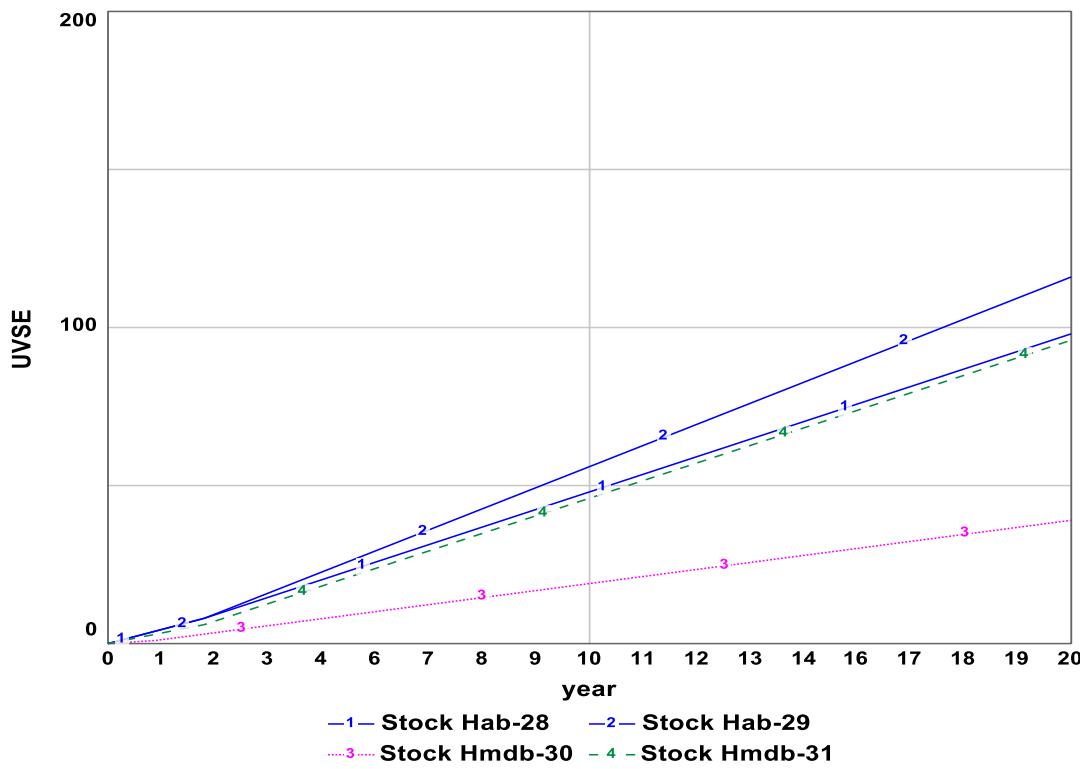
Dimensión política: capacitación y sensibilización ambiental (CSA), nivel educativo (NE), factor de acceso a crédito (AC), área con agroecosistemas sostenibles: área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC).

SE valorados	Ecuación (indicadores por medio de los cuales se valora el SE)
Hab-28: mantenimiento de las condiciones ideales para especies animales o vegetales	$Stock_{Hab_28}(t) = Stock_{Hab_28}(t - dt) + (Hab_28) dt$ $Hab_28(dt) = UVSE_PCB + UVSE_PCA + UVSE_MOs + UVSE_Abs + UVSE_DS + UVSE_ASCEDC$
Hab-29: generación de condiciones para refugio, alimentación y sitio de reproducción	$Stock_{Hab_29}(t) = Stock_{Hab_29}(t - dt) + (Hab_29) dt$ $Hab_29(dt) = UVSE_PCB + UVSE_PCA + UVSE_MOs + UVSE_Abs + UVSE_DS + UVSE_ASCEDC$
Hmdb-30: conservación de material genético	$Stock_{Hmdb_30}(t) = Stock_{Hmdb_30}(t - dt) + (Hmdb_30) dt$ $Hmdb_30(dt) = UVSE_ASCEDC + UVSE_AsA$
Hmdb-31: variedad de especies que interactúan dentro y fuera del agroecosistema	$Stock_{Hmdb_31}(t) = Stock_{Hmdb_31}(t - dt) + (Hmdb_31) dt$ $Hmdb_31(dt) = UVSE_Abs + UVSE_PCB + UVSE_PCA + UVSE_MOs + UVSE_DS$

Fuente: autor (2018)

Las funciones de hábitat incluyen 4 servicios ecosistémicos (SE). La modelación refleja que al año 20 de establecimiento del agroecosistema tipo, los SE con mayor Stock en unidades de valor de servicio ecosistémico (UVSE) derivadas del análisis de los indicadores son: generación de condiciones para refugio, alimentación y sitio de reproducción (Hab-29) con 116 UVSE, mantenimiento de las condiciones ideales para especies animales o vegetales (Hab-28) con 98 UVSE, variedad de especies que interactúan dentro y fuera del agroecosistema (Hmdb-31) con 96 UVSE y conservación de material genético (Hmdb-30) con 39 UVSE (figura 5-25).

Figura 5-25. UVSE: funciones de hábitat



Fuente: autor (2018)

5.4.6.3 Valoración de SE de producción

La modelación determina que los indicadores que aportan en mayor medida al stock de UVSE de los SE asociados a las funciones de producción son diversificación de ingresos (DI), estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV) y energía generada en el agroecosistema (EGA).

La diversificación de ingresos (DI) se encuentra asociada a la producción de materias primas (Pmp-35), productos secundarios (Pmp-36), abonos verdes (Pmp-38) y producción de fertilizantes (Pmp-39) derivados de la transformación de residuos de cosechas. La pulpa de café para producción de humus de lombriz utilizado en la fertilización, la descomposición del materia orgánica aportada por los árboles de sombra y la generación de leña como energía en el proceso de secado del café pergamino son actividades que valoran SE de producción. El agroecosistema genera otros productos secundarios como excedentes de la parcela de autoconsumo, la venta de los productos secundarios mejora los ingresos del productor en el agroecosistema modelado.

Los indicadores estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV) y energía generada en el agroecosistema (EGA) por medio de los combustibles producidos (leña, cisco y biogás) y el

producto principal (café pergamino seco) contribuyen al stock de UVSE de SE de producción Pmp-37 y Pmp-39. La autosuficiencia alimentaria (AsA) y el índice de seguridad alimentaria (ISA) por medio de los productos de autoconsumo y el cultivo principal, generan UVSE para SE de provisión de alimentos (Pa-32), producción de forraje (Pa-33), producción de carne y derivados animales para consumo humano (Pa-34). Los indicadores y las ecuaciones por medio de las cuales se aportan UVSE a los SE de producción se especifican en la tabla 5-11.

Tabla 5-11. Modelo formal: servicios ecosistémicos de producción valorados

UVSE= Unidad de valor de servicio ecosistémico.

Indicadores dimensión ecológica: dinámica media de sombra (DS), prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA), materia orgánica en el suelo (MOs), densidad aparente (DA), retención de humedad en el suelo (RHS), actividad biológica en el suelo (Abs), aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S), prácticas de conservación de la vida en el suelo (PCVS, captura de CO₂ (CDC).

Dimensión sociocultural: pérdida de cosechas (PC), autosuficiencia alimentaria (AsA), índice de seguridad alimentaria (ISA), diversificación de la producción (A1), participación de mujeres en concejos comunitarios (MCP).

Dimensión tecnológica: estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV), energía generada por el agroecosistema (EGA), prácticas agroecológicas locales (PAL).

Dimensión económica: prácticas de control biológico (PCB), balance energético (BE), rendimiento de los productos (RP), diversificación de ingresos (DI), valorización de residuos (VR), generación de empleo agrícola (GEA), calidad de vida (CV).

Dimensión política: capacitación y sensibilización ambiental (CSA), nivel educativo (NE), factor de acceso a crédito (AC), área con agroecosistemas sostenibles: área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC).

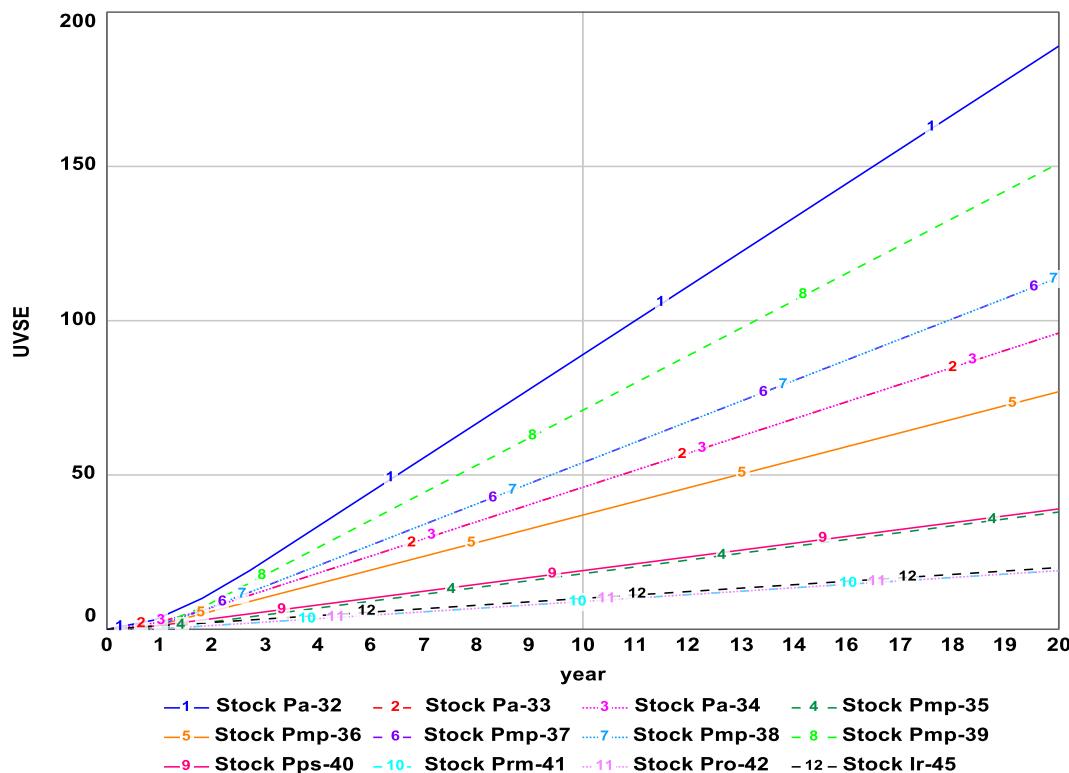
SE valorados	Ecuación (indicadores por medio de los cuales se valora el SE)
Pa-32: provisión de alimentos para consumo humano	$\begin{aligned} Stock_{Pa_32}(t) &= Stock_{Pa_32}(t - dt) + (Pa_32) dt \\ Pa_32(dt) &= SE_AsA + UVSE_ISA + UVSE_A1 + UVSE_EGA + UVSE_BE \\ &\quad + UVSE_RP + UVSE_GEA + UVSE_CV + UVSE_AC + UVSE_ASCEDC \end{aligned}$
Pa-33: producción de forraje y alimentos para animales	$\begin{aligned} Stock_{Pa_33}(t) &= Stock_{Pa_33}(t - dt) + (Pa_33) dt \\ Pa_33(dt) &= UVSE_AsA + UVSE_ISA + UVSE_A1 + UVSE_CV + UVSE_AC \end{aligned}$
Pa-34: producción de carne y derivados animales para consumo humano	$\begin{aligned} Stock_{Pa_34}(t) &= Stock_{Pa_34}(t - dt) + (Pa_34) dt \\ Pa_34(dt) &= UVSE_AsA + UVSE_ISA + UVSE_A1 + UVSE_CV + UVSE_AC \end{aligned}$
Pmp-35: producción de materias primas	$\begin{aligned} Stock_{Pmp_35}(t) &= Stock_{Pmp_35}(t - dt) + (Pmp_35) dt \\ Pmp_35(dt) &= UVSE_EMAV + UVSE_DI \end{aligned}$
Pmp-36: generación de productos secundarios	$\begin{aligned} Stock_{Pmp_36}(t) &= Stock_{Pmp_36}(t - dt) + (Pmp_36) dt \\ Pmp_36(dt) &= UVSE_EMAV + UVSE_EGA + UVSE_DI + UVSE_ASCEDC \end{aligned}$
Pmp-37: producción de combustibles y energía	$\begin{aligned} Stock_{Pmp_37}(t) &= Stock_{Pmp_37}(t - dt) + (Pmp_37) dt \\ Pmp_37(dt) &= UVSE_EMAV + UVSE_EGA + UVSE_BE + UVSE_VR + UVSE_ASCEDC \end{aligned}$
Pmp-38: producción de abonos verdes	$\begin{aligned} Stock_{Pmp_38}(t) &= Stock_{Pmp_38}(t - dt) + (Pmp_38) dt \\ Pmp_38(dt) &= UVSE_EMAV + UVSE_EGA + UVSE_BE + UVSE_DI + UVSE_VR + UVSE_ASCEDC \end{aligned}$
Pmp-39: producción de fertilizantes	$\begin{aligned} Stock_{Pmp_39}(t) &= Stock_{Pmp_39}(t - dt) + (Pmp_39) dt \\ Pmp_39(dt) &= UVSE_EMAV + UVSE_EGA + UVSE_BE + UVSE_DI + UVSE_VR + UVSE_ASCEDC + UVSE_{(N, P, K, Mg, S)} \end{aligned}$
Pps-40: provisión de semillas o especies locales adaptadas	$\begin{aligned} Stock_{Pps_40}(t) &= Stock_{Pps_40}(t - dt) + (Pps_40) dt \\ Pps_40(dt) &= UVSE_DI + UVSE_ASCEDC \end{aligned}$
Prm-41: plantas utilizadas para preparación de medicina	$\begin{aligned} Stock_{Prm_41}(t) &= Stock_{Prm_41}(t - dt) + (Prm_41) dt \\ Prm_41(dt) &= UVSE_DI \end{aligned}$
Pro-42: plantas o árboles con potencial de uso ornamental	$\begin{aligned} Stock_{Pro_42}(t) &= Stock_{Pro_42}(t - dt) + (Pro_42) dt \\ Pro_42(dt) &= UVSE_DI \end{aligned}$

Fuente: autor (2018)

Las funciones de producción incluyen 11 servicios ecosistémicos (SE). La modelación refleja que al año 20 de establecimiento del agroecosistema tipo, los SE con mayor stock en unidades de valor de servicio ecosistémico (UVSE) derivadas del análisis de los indicadores son: provisión de alimentos para consumo humano (Pa-32) con 189 UVSE, producción de fertilizantes (Pmp-39) con 151 UVSE, producción de combustibles y energía (Pmp-37) y producción de abonos verdes (Pmp-

38) con 114 UVSE. Producción de forraje y alimentos para animales (Pa-33), producción de carne y derivados animales para consumo humano (Pa-34) con 96 UVSE y generación de productos secundarios (Pmp-36) con 77 UVSE. Los SE con menor aporte de UVSE son: plantas utilizadas para preparación de medicina (Prm-41), plantas o árboles con potencial de uso ornamental (Pro-42) con 19 UVSE y provisión de semillas o especies locales adaptadas (Pps-40) con 38 UVSE (figura 5-26).

Figura 5-26. UVSE: funciones de producción



Fuente: autor (2018)

5.4.6.4 Valoración de SE de información

Los indicadores modelados que aportan en mayor medida al stock de UVSE de los SE asociados a las funciones de información son: capacitación y sensibilización ambiental (CSA), calidad de vida (CV) y factor de acceso a crédito (AC).

La federación de cafeteros en los informes de gestión de los años 2005 y 2017, reporta un aumento en las áreas sembradas con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC), categoría donde se incluyen los agroecosistemas de café bajo sombra. La federación igualmente reporta un aumento en el número de capacitaciones realizadas en temas técnicos relacionados con el cultivo principal.

Tabla 5-12. Modelo formal: servicios ecosistémicos de información valorados

UVSE= Unidad de valor de servicio ecosistémico.

Indicadores dimensión ecológica: dinámica media de sombra (DS), prácticas de cosecha, protección y uso eficiente del agua (PCA), materia orgánica en el suelo (MOs), densidad aparente (DA), retención de humedad en el suelo (RHs), actividad biológica en el suelo (Abs), aporte de elementos mayores y menores (N, P, K, Mg, S), prácticas de conservación de la vida en el suelo (PCVS, captura de CO₂ (CDC).

Dimensión sociocultural: pérdida de cosechas (PC), autosuficiencia alimentaria (AsA), índice de seguridad alimentaria (ISA), diversificación de la producción (A1), participación de mujeres en concejos comunitarios (MCP).

Dimensión tecnológica: estrategias o mecanismos de agregación de valor (EMAV), energía generada por el agroecosistema (EGA), prácticas agroecológicas locales (PAL).

Dimensión económica: prácticas de control biológico (PCB), balance energético (BE), rendimiento de los productos (RP), diversificación de ingresos (DI), valorización de residuos (VR), generación de empleo agrícola (GEA), calidad de vida (CV).

Dimensión política: capacitación y sensibilización ambiental (CSA), nivel educativo (NE), factor de acceso a crédito (AC), área con agroecosistemas sostenibles: área sembrada con cafés especiales en el departamento de Caldas (ASCEDC).

SE valorados	Ecuación (indicadores por medio de los cuales se valora el SE)
Ire-43: disfrute del paisaje	$Stock_{Ire_43}(t) = Stock_{Ire_43}(t - dt) + (Ire_43) dt$ $Ire_43(dt) = UVSE_ASCEDC$
Ire-44: generación de actividades conexas (turismo rural)	$Stock_{Ire_44}(t) = Stock_{Ire_44}(t - dt) + (Ire_44) dt$ $Ire_44(dt) = UVSE_DI + UVSE_ASCEDC$
Ir-45: generación de actividades recreativas para la comunidad local	$Stock_{Ir_45}(t) = Stock_{Ir_45}(t - dt) + (Ir_45) dt$ $Ir_45(dt) = UVSE_CSA$
Ieca-46: generación y conservación de tradiciones y costumbres	$Stock_{Ieca_46}(t) = Stock_{Ieca_46}(t - dt) + (Ieca_46) dt$ $Ieca_46(dt) = UVSE_CV + UVSE_CSA + UVSE_NE + UVSE_MCP + UVSE_AC$
Lehe-47: conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales	$Stock_{Lehe_47}(t) = Stock_{Lehe_47}(t - dt) + (Lehe_47) dt$ $Lehe_47(dt) = UVSE_CV + UVSE_CSA + UVSE_NE + UVSE_MCP + UVSE_AC$
Lehe-48: uso de especies con fines religiosos, espirituales o históricos	$Stock_{Lehe_48}(t) = Stock_{Lehe_48}(t - dt) + (Lehe_48) dt$ $Lehe_48(dt) = UVSE_MCP$
Idce-49: generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos	$Stock_{Idce_49}(t) = Stock_{Idce_49}(t - dt) + (Idce_49) dt$ $Idce_49(dt) = UVSE_CV + UVSE_CSA + UVSE_NE + UVSE_MCP + UVSE_AC$

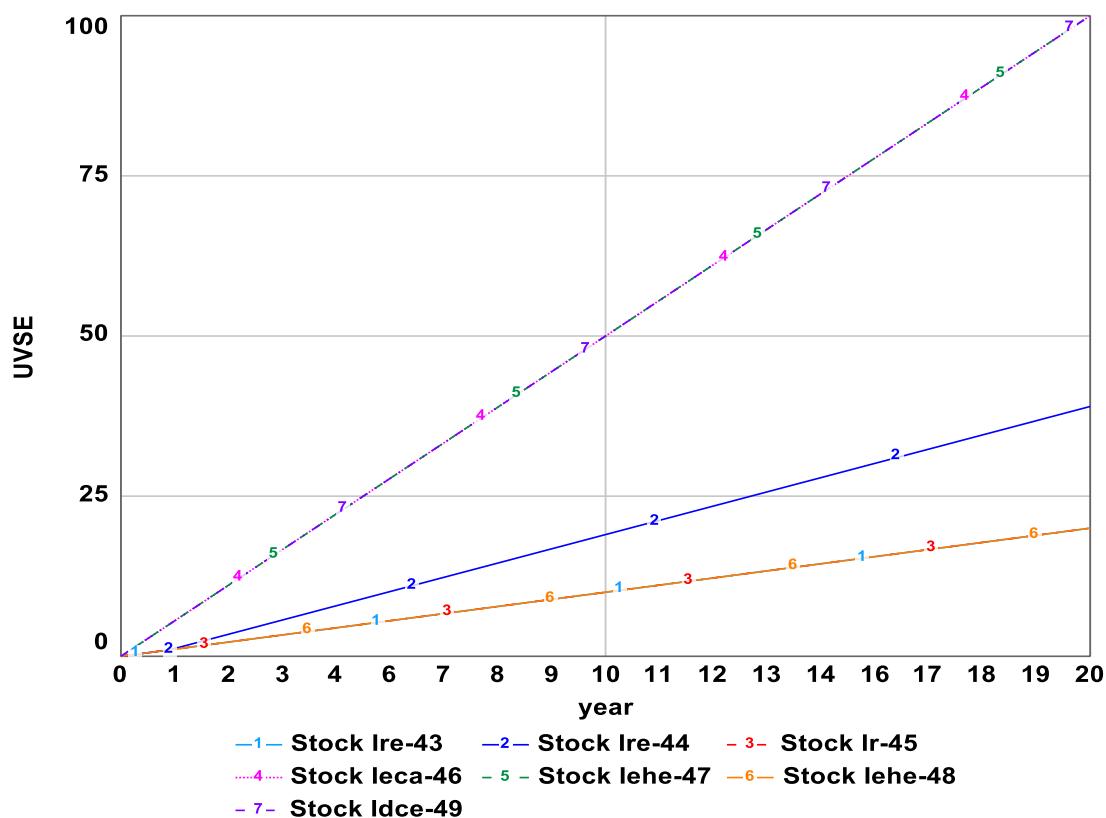
Fuente: autor (2018)

Las capacitaciones realizadas a través de la federación y las organizaciones campesinas aumentan la participación de la comunidad y mejoran la inclusión social de minorías, generando integración, conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales (lehe-47) y preservación del conocimiento local en cuanto a especies y sus usos (Idce-49). Las actividades de integración alrededor del agroecosistema modelado incluyen la generación de actividades recreativas para sus miembros (Ir-45), el enriquecimiento cultural y la conservación de tradiciones y costumbres (Ieca-46).

Las ASCEDC repercuten en indicadores como el factor de acceso a crédito (AC) y la calidad de vida (CV). Mejoran el nivel educativo (NE), el índice de seguridad alimentaria (ISA), el riesgo económico (RE) y el acceso a agua potable (AAP) para el grupo familiar. La importancia del agroecosistema para la economía genera inversiones en acueductos veredales, construcción de pozos sépticos, programas de producción y comercialización de productos asociados al café y el reconocimiento del paisaje cultural cafetero. Las ASCEDC generan SE como el disfrute del paisaje (Ire-43) y la generación de actividades conexas (turismo rural) (Ire-44). Los indicadores y las ecuaciones por medio de las cuales se aportan UVSE a los SE de información se especifican en la tabla 5-12.

Las funciones de información incluyen 7 servicios ecosistémicos (SE). La modelación refleja que al año 20 de establecimiento, los SE con mayor Stock en unidades de valor de servicio ecosistémico (UVSE) derivadas del análisis de los indicadores modelados son: generación y conservación de tradiciones y costumbres (Ieca-46), conservación de sistemas agrícolas tradicionales locales o patrimoniales (Lehe-47) y generación de conocimiento sobre la diversidad de especies y sus usos (Idce-49) con 100 UVSE. Generación de actividades conexas (turismo rural) (Ire-44) con 39 UVSE, disfrute del paisaje (Ire-43), generación de actividades recreativas para la comunidad local (Ir-45) y uso de especies con fines religiosos, espirituales o históricos (Lehe-48) con 20 UVSE (figura 5-27).

Figura 5-27. UVSE: funciones de información



Fuente: autor (2018)

6. Conclusiones y recomendaciones

En la presente sección se desarrollan las conclusiones de la disertación doctoral, en las cuales se resaltan las reflexiones, contribuciones y propuestas derivadas del proceso investigativo. Posteriormente se describen recomendaciones para que futuros trabajos pueda implementar la metodología de valoración planteada y las limitaciones identificadas.

6.1 Conclusiones

Las contribuciones desde la economía ecológica a la valoración de los servicios ecosistémicos (SE) en agroecosistemas tienen considerables potencialidades al ser abordadas desde un punto de vista integral entre las teorías y las metodologías. Cuando las dimensiones sociocultural, económica, ecológica, política y tecnológica se incluyen en los procesos de valoración, es posible que las comunidades reconozcan la importancia o valor que tienen los SE para su bienestar. En este sentido, la capacidad de las comunidades de reorganizar las relaciones con el agroecosistema y los ecosistemas de su entorno, alcanza un rol preponderante en los procesos de valoración.

Derivada de esta disertación doctoral se propone la conceptualización a la valoración de los SE desde la economía ecológica por medio de ocho aspectos claves: (1) el concepto de agroecosistema sostenible, (2) el valor multidimensional de los SE, (3) los enfoques que direccionan el proceso de valoración, (4) el marco de valoración constituido por dimensiones, principios, criterios e indicadores, (5) la metodología basada en la modelación en dinámica de sistemas, (6) el modelo general de valoración, (7) la unidad de valor de servicios ecosistémicos (UVSE) y (8) el agroecosistema tipo en el cual se aplica el marco de valoración y la modelación en dinámica de sistemas. A continuación se profundiza en cada uno de los aspectos claves mencionados:

- El concepto de agroecosistema sostenible: para lograr una aproximación integral a la valoración de los SE desde la economía ecológica y la agroecología en esta investigación se avanza más allá del concepto de agroecosistema, debido a la amplitud del concepto manejada por múltiples autores y la referencia aislada de rasgos relevantes asociados a la sostenibilidad. Condición que deriva en la propuesta del concepto de agroecosistema sostenible (AS) realizada en esta investigación. El AS debe ser diseñado y manejado como un sistema complejo, implementando macroaspectos de sostenibilidad y aportando al bienestar de las comunidades. La propuesta del concepto de AS permite a las futuras investigaciones identificar las características de un agroecosistema para generar SE que puedan ser estudiados y valorados. Sumado a lo anterior, en la literatura consultada no se identifican y clasifican de manera formal los SE generados por los AS, acción realizada por esta investigación, ya que el hacer evidente la existencia del SE es el primer paso en su valoración.
- El valor multidimensional de los SE: establecer el valor multidimensional de los SE es un esfuerzo realizado desde la economía ecológica que suma múltiples autores y más de dos décadas de trabajos. La contribución lograda por esta investigación se deriva de la integración de la teoría de sistemas, de la sostenibilidad fuerte y del valor, para proponer cinco dimensiones y definir cinco enfoques que direccionan el proceso de valoración. Igualmente, el concluir que la dimensión ecológica es la base de las demás dimensiones, como fundamento para el desarrollo de la estructura, los procesos y las funciones ecosistémicas que generan los SE.

- Los enfoques: las dimensiones hacen referencia al espectro para analizar el concepto de valor. Sin embargo, no es suficiente con una consideración multidimensional, se evidencia la necesidad de establecer los énfasis desde los cuales se direcciona el proceso de valoración. Al respecto, diversos autores proponen términos como aproximaciones, orientaciones, caracteres o rasgos. La contribución desde la economía ecológica en esta investigación consiste en consolidar los términos utilizados y definir los enfoques de valoración (transdisciplinar, sistémico, ecológico, multidimensional y participativo). Enfoques que permiten identificar la importancia de los SE en las diferentes dimensiones. El valor de los SE puede ser utilizado en los procesos de toma de decisiones sobre la gestión de los agroecosistemas para garantizar su provisión.
- El marco de valoración: las contribuciones metodológicas desde la economía ecológica a la valoración de SE realizadas por esta investigación, se centran en el marco de valoración constituido por dimensiones, principios, criterios e indicadores. Para lograr una aproximación integral a la valoración las dimensiones son aplicadas mediante 12 principios, cuyo nivel de cumplimiento muestra el valor que tiene un servicio para el funcionamiento del agroecosistema. Los principios se miden a través de 36 criterios, la aplicación de los criterios es cuantificada mediante indicadores asociados a las características particulares del agroecosistema estudiado. Los principios y criterios pueden favorecer la valoración de uno o varios SE y aportar a diferentes dimensiones, la valoración de un SE genera un efecto de sinergia positiva sobre otros SE, mejorando su provisión.
- La metodología basada en la modelación en dinámica de sistemas: la economía ecológica cuenta con metodologías que han sido empleadas en la valoración de SE como la valoración multicriterio, la valoración deliberativa consultiva, la valoración mediante modelación en dinámica de sistemas, la valoración por medio de balances energéticos o biofísicos, la valoración a través de lógica difusa y la valoración por medio de modelación basada en agentes. Tales metodologías responden en mayor o menor medida a las necesidades que las investigaciones en SE requieren, como la capacidad para incorporar interrelaciones entre dimensiones, sinergias y comportamientos emergentes, la posibilidad de integrarse con otras metodologías de valoración, la incorporación de análisis cualitativos y cuantitativos que incluyan el conocimiento científico y local, la articulación entre los principios y criterios de valoración y la realización de análisis de sensibilidad y escenarios. En la reflexión frente a las contribuciones metodológicas desde la economía ecológica, esta investigación aporta la consolidación de la metodología de valoración de SE mediante modelación en dinámica de sistemas. Metodología que permite involucrar el marco de valoración multidimensional, el análisis multicriterio y la información cuantitativa asociada a balances energéticos o biofísicos, convirtiéndose en una propuesta de integración metodológica.
- El modelo general de valoración: da respuesta a la necesidad de representaciones conceptuales para generar conocimiento y aportar a la comprensión de la complejidad que existe en los procesos de valoración. El modelo general va más allá del lenguaje matemático o informático, incorporando el aprendizaje logrado durante el proceso de construcción. La propuesta de un modelo general basado en ciclos causales es un aporte significativo y novedoso que, al componerse de indicadores interdimensionales, refleja la complejidad del sistema. Igualmente, el modelo general demuestra como un SE puede ser valorado por indicadores de diferentes dimensiones, potenciando su importancia dentro del

agroecosistema. El modelo general propuesto es un marco de referencia para futuras investigaciones, ya que se adapta a las particularidades de los procesos de valoración.

- La unidad de valor de servicios ecosistémicos (UVSE): establece un aporte de valor unitario cada vez que el indicador calculado en el modelo reporta una magnitud física (como en el caso de indicadores ecológicos) o cualitativa (en el caso de indicadores como prácticas agroecológicas locales) durante un periodo. La UVSE permite identificar los SE que tienen mayor valor o importancia en el agroecosistema y los SE con valores reducidos sobre los cuales se debe actuar para aumentar su provisión. La propuesta de cálculo de UVSE está condicionada por los indicadores implementados en el modelo, aspecto que se constituye en una oportunidad de investigación, para cuantificar indicadores relevantes que permitan valorar SE de interés. Conocer los SE con mayor UVSE, contribuye a definir estrategias de diseño y manejo para mantener la provisión de lo SE importantes y acciones a realizar para potenciar los SE menos valorados.
- El agroecosistema tipo (AT): el concepto de AS permite identificar el agroecosistema tipo sobre el cual se implementa la metodología de valoración propuesta. Se evidencia que, al gestionarse el AS como un sistema complejo, se promueven las interrelaciones y sinergismos entre los componentes que generan funciones y servicios ecosistémicos. Además, permite comprender como la implementación de los macroaspectos influencia la conservación, mantenimiento y promoción de los SE. Igualmente, un mayor conocimiento de las relaciones de los SE generados sobre el bienestar de las comunidades, ayuda a evidenciar su valor y a fortalecer la implementación de los macroaspectos de sostenibilidad.

La metodología de valoración propuesta se implementa en un agroecosistema tipo (AT). El método definido para establecer el AT se convierte en un aporte que identifica los agroecosistemas colombianos en los cuales el interés de la comunidad científica es relevante. La selección del AT determina las dimensiones consideradas en los procesos de valoración, los indicadores que son medidos y los rasgos fundamentales de un agroecosistema sostenible que permiten generar y conservar las funciones y SE. Bajo el método propuesto, en Colombia los agroecosistemas tipo identificados son: café con semisombra, café con sombra y cacao tradicional. El agroecosistema tipo colombiano seleccionado para la modelación y simulación es el sistema de producción de café bajo sombra, debido a su nivel de implementación de los macroaspectos de sostenibilidad, el aporte al bienestar de las comunidades y el acceso a la información necesaria para el cálculo de los indicadores.

Para el agroecosistema modelado (café bajo sombra) se calculan nueve (9) indicadores de la dimensión del valor ecológico, cinco (5) indicadores de la dimensión del valor sociocultural, tres (3) indicadores de la dimensión del valor tecnológico, siete (7) indicadores de la dimensión de valor económico y cuatro (4) indicadores de la dimensión de valor político. La cantidad de indicadores refleja las dimensiones que más se consideran en los procesos de valoración y sobre las cuales se genera más información. Se identifica la necesidad de fortalecer la investigación en Colombia en indicadores del valor tecnológico, sociocultural y político de los SE.

La modelación determina que en el agroecosistema tipo (café bajo sombra) las funciones de regulación presentan una mayor valoración con 1480 UVSE al año 20. Por su parte las funciones de producción reflejan 940 UVSE, las funciones de hábitat 345 UVSE y las funciones de información 374 UVSE. De manera global, los SE más valorados en el agroecosistema café bajo sombra son: aumento de la resiliencia del agroecosistema y

adaptación a condiciones cambiantes, conservación de la humedad del suelo, conservación del suelo productivo, presencia de insectos mejorando la polinización de los cultivos, control de la contaminación de cuerpos de agua y suelos, promoción de la biología del suelo por adición de materia orgánica y excreciones radiculares, incorporación de residuos de cosechas y animales a los flujos de materia y energía, provisión de cobertura para conservación de suelo y agua, producción y movilización de nutrientes y detoxificación de elementos nocivos.

Los SE menos valorados en el agroecosistema tipo (café bajo sombra) son: producción de sustancias químicas para estimular componentes deseados y suprimir componentes indeseables (sustancias alelo-químicas, repelentes, etc.), almacenamiento de carbono en especies arbóreas del agroecosistema, plantas o árboles con potencial de uso ornamental, disfrute del paisaje y uso de especies con fines religiosos, espirituales o históricos. La identificación de los SE con menor importancia o valor indica una oportunidad para futuras investigaciones de incrementar su comprensión, con el propósito de generar conocimiento sobre su significación o importancia para los grupos humanos que los valoran.

6.2 Recomendaciones

Como recomendaciones para la implementación de la metodología de valoración de SE en un agroecosistema específico, se debe iniciar por una lectura reflexiva del marco de valoración. El investigador debe identificar las relaciones entre las dimensiones del valor, los principios y los criterios. Posteriormente, se deben revisar los indicadores identificados y propuestos por esta investigación (anexo C), para determinar su pertinencia con el agroecosistema estudiado y el acceso a la información en series de tiempo para el cálculo respectivo.

El modelo al ser de carácter general es una aproximación conceptual a la comprensión de las relaciones, influencias e interdependencias que se establecen en el agroecosistema sostenible para la generación de los SE. El modelo puede aplicarse en cualquier contexto, sin embargo, su implementación requiere que el investigador establezca los indicadores pertinentes en el modelo, verificando las relaciones y la disponibilidad de la información requerida para su cálculo.

Como limitaciones de la metodología de valoración, se evidencia que en el proceso de cálculo de los indicadores se carece de continuidad en los estudios para generar datos en series de tiempo. Situación que restringe el análisis del comportamiento dinámico y dificulta la representatividad estadística de las predicciones. Por otra parte, se evidencia que, para la implementación de la metodología de valoración propuesta, se deben involucrar profesionales con conocimientos en modelación de dinámica de sistemas.

Finalmente, como posible camino investigativo se identifica la posibilidad de profundizar en la integración de la valoración multicriterio en el marco de valoración propuesto. Es posible otorgar diferentes pesos a los principios y a los criterios, según los intereses de actores como comunidades, instituciones, políticas, entre otros. Estos pesos también pueden estar relacionados con las restricciones o potencialidades biogeográficas donde se encuentre el agroecosistema estudiado, o con los SE que se deseen potencializar.

A. Anexo: análisis de relaciones

B. Anexo: encuesta de validación

C. Anexo: criterios e indicadores de valoración de SE en AS

D. Anexo: cálculo de indicadores y soportes estadísticos

Bibliografía

- Abaunza Osorio, F., Arango Aramburo, S., & Olaya Morales, Y. (2011). Simulación de estrategias de inversión para pequeños caficultores colombianos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*; Vol. 64, núm. 2 (2011) 2248-7026 0304-2847.
- Acuna, V., & Antonio, R. (2016). Efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades, a través del microclima, fenología y estado fisiológico del cafeto. CIRAD.
- Adger, W. N. (2000). Social and ecological resilience: are they related? *Progress in human geography*, 24(3), 347-364.
- Aguilar-Jiménez, C. E., Tolón-Becerra, A., & Lastra-Bravo, X. (2011). Evaluación integrada de la sostenibilidad ambiental, económica y social del cultivo de maíz en Chiapas, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 43(1), 155-174.
- Aguilar-Ruiz, J. A. (2012). Impacto socioeconómico y ambiental de la certificación orgánica-comercio justo de café (*Coffea arabica*) en la Región Frailesca, Chiapas, México.
- Aguilera, D. U. (2006). El valor económico del medio ambiente. *Revista Ecosistemas*, 15(2).
- Alanoca, N. (2012). *Prácticas del saber ancestral en el manejo de indicadores climáticos y su aplicación en subsistemas agrícolas en el Departamento de Potosí* (No. CIDAB-T-QH541-N5p). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz (Bolivia). Facultad de Agronomía.
- Albin, Stephanie. 1997. "Building a System Dynamics Model Part 1: Conceptualization" (June): 34.
- Alemán, B., Alejandra, A., Reyes, P., & Cristina, A. (2017). *Utilización del humus Lombriz Roja Californiana (EISENIA FOETIDA) como alternativa amigable al medio ambiente para el cultivo del café, finca Santa Dolores, Municipio el Crucero, enero junio 2016* Autores (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua).
- Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food & Agriculture Org.
- Altieri, M. A. (1989). Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 27(1-4), 37-46.
- Altieri, M. A. (1995). *Agroecology: the science of sustainable agriculture* (No. Ed. 2). Intermediate Technology Publications Ltd (ITP).
- Altieri, M. A. (2002). Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. *SARANDÓN, SJ Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable*. Buenos Aires-La Plata, 49-56.
- Altieri, M. (2009). El estado del arte de la agroecología: Revisando avances y desafíos. *Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones*, 77.
- Altieri, M. A. H., Liebman, S., Magdoff, M., Norgaard, F., Sikor, R., & Thomas, O. (1999). *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan-Comunidad.
- Altieri, M., & Nicholls, C. I. (2000). Teoría y práctica para una agricultura sustentable. *Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental*, 1.

Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2002). Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales.
- Altieri, M., & Nicholls, C. (2004). *Biodiversity and pest management in agroecosystems*. CRC Press.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2005). *Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture*. United Nations Environmental Programme, Environmental Training Network for Latin America and the Caribbean.
- Altieri, M. Á., & Nicholls, C. I. (2007). *Biodiversidad y manejo de plagas en agroecosistemas* (Vol. 2). Icaria Editorial.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. (2008). Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*, 3(7), 7-23.
- Altieri, M., & Nicholls, C. (2009). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA revista de agroecología*, 14, 5-8.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. (2010). Diseños agroecológicos para incrementar la biodiversidad de entomofauna benéfica en agroecosistemas. *Publicado por SOCLA. Medellín, Colombia*.
- Altieri, M. A., & Toledo, V. M. (2011). The agroecological revolution in Latin America: rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies*, 38(3), 587-612.
- Altieri, M. Á., & Nicholls, C. I. (2012). Agroecología: única esperanza para la soberanía alimentaria y la resiliencia socioecológica. *Agroecología*, 7(2), 65-83.
- Altieri, M. A., Koohafkan, P., & Giménez, E. H. (2012). Agricultura verde: fundamentos agroecológicos para diseñar sistemas agrícolas biodiversos, resilientes y productivos. *Agroecología*, 7(1), 7-18.
- Altieri, M. A. (2013). Construyendo resiliencia socioecológica en agroecosistemas: algunas consideraciones conceptuales y metodológicas. *Agroecología y resiliencia socioecológica: adaptándose al cambio climático* (Nicholls CI, Ríos LA, Altieri MA, eds). Proyecto REDAGRES. Medellín, Colombia, 94-104.
- Álvarez Uribe, M. C., Mancilla López, L. P., & Cortés Torres, J. E. (2007). Caracterización socioeconómica y seguridad alimentaria de los hogares productores de alimentos para el autoconsumo, Antioquia-Colombia. *Agroalimentaria*, 13(25).
- Anderies, J., Janssen, M., & Ostrom, E. (2004). A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecology and society*, 9(1).
- Andrade, H. J., & Segura, M. A. (2016). Dinámica de la sombra de Cordia Alliodora en sistemas agroforestales con café en Tolima, Colombia. *Agronomía Costarricense*, 40(2).
- Arcila, J., Farafán, F., Moreno, A. M., Salazar, L. F., & Hincapié, E. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia.
- Arcila Pulgarín, J. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. Sistemas de producción de café en Colombia. CENICAFE, Chinchiná, Colombia, 21-60.
- Arias-Arévalo, P. (2017). *Integrating plural values in ecosystem services valuation: an ecological economics approach* (Doctoral dissertation, Universitat Autònoma de Barcelona).
- Aristizábal, C., & Duque, H. (2009). Identificación de los patrones de consumo en fincas de economía campesina de la zona cafetera central de Colombia.

- Astier, M., Masera, O. R., & Galván-Miyoshi, Y. (2008). *Evaluación de sustentabilidad: un enfoque dinámico y multidimensional* (No. Sirsi i9788461256419). Valencia: SEAE.
- Avellaneda-Torres, L. M., Rojas, E. T., & Sicard, T. E. L. (2014). Agricultura y vida en el páramo: una mirada desde la vereda El Bosque (Parque Nacional Natural de Los Nevados). *Cuadernos de Desarrollo Rural= International Journal of Rural Development*, 11(73), 105.
- Azzi, G. (1956). Agricultural ecology. *Agricultural ecology*.
- Bacon, C., Getz, C., Kraus, S., Montenegro, M., & Holland, K. (2012). The social dimensions of sustainability and change in diversified farming systems. *Ecology and Society*, 17(4).
- Balvanera, P., Castillo, A., Chavero, E. L., Caballero, K., Quijas, S., Flores, A., ... & Maass, M. (2011). Marcos conceptuales interdisciplinarios para el estudio de los servicios ecosistémicos en América Latina. El valor ecológico, social y económico de los servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y estudio de casos, pp: 00.
- Barkin, D., & Tagle-Zamora, D. (2012). *La significación de una economía ecológica radical*. Revibec: revista de la Red Iberoamericana de economía ecológica, 19, 0001-14.
- Barlas, Yaman. 1989. "Multiple Tests for Validation of System Dynamics Type of Simulation Models." *European Journal of Operational Research* 42 (1) (September): 59–87. doi:10.1016/0377-2217(89)90059-3.
- Barlas, Y. (1994, July). Model validation in system dynamics. In *Proceedings of the 1994 international system dynamics conference* (pp. 1-10). Sterling, Scotland.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 12(3), 183-210. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4)
- Barzev, R. (2002). *Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales: corredor biológico mesoamericano* (No. 333.716 B3.).
- Bastida, E. J. L., Alonso, J. R. P., & González, M. S. (2013). La necesidad de medir el desarrollo local con indicadores de economía ecológica. *Universidad y Sociedad*, 5(2).
- Bautista Rodríguez, S. C. (2015). *Sustainability assesment of biodiesel production in Colombia* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Bogotá).
- Bautista, S., Narváez, P., Camargo, M., Chery, O., & Morel, L. (2016). Biodiesel-TBL+: A new hierarchical sustainability assessment framework of PC&I for biodiesel production–Part I. *Ecological Indicators*, 60, 84-107.
- Barrezueta Unda, S. (2015). Introducción a la sostenibilidad agraria: con enfoque de sistemas e indicadores.
- Beer, J., Harvey, C. A., Ibrahim, M., Harmand, J. M., Somarriba Chávez, E., & Jiménez Otárola, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en la américa*, 10, 28-37.
- Belcher, K. W., Boehm, M. M., & Fulton, M. E. (2004). Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach. *Agricultural systems*, 79(2), 225-241.
- Belem, M., & Saqalli, M. (2017). Development of an integrated generic model for multi-scale assessment of the impacts of agro-ecosystems on major ecosystem services in West Africa. *Journal of Environmental Management*, 202, 117-125.

Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

- Bennett, E. M., Peterson, G. D., & Gordon, L. J. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology letters*, 12(12), 1394-1404.
- Berbés-Blázquez, M. (2012). A participatory assessment of ecosystem services and human wellbeing in rural Costa Rica using photo-voice. *Environmental Management*, 49(4), 862-875.
- Bertalanffy, L. (1992). Perspectivas en la teoría general de sistemas: estudios científico-filosóficos. *Madrid: Alianza*, 153-154.
- Betancourth-Loaiza, L. L. (2010). Los consumidores ecológicos y el fomento de los mercados verdes: una alternativa hacia el bienestar espíritu, mente y salud a partir de la adopción de estilos de vida saludables. *Eleuthera*, 4, 193-211.
- Blanco, J., Pascal, L., Ramon, L., Vandenbroucke, H., & Carrière, S. M. (2013). *Agrobiodiversity performance in contrasting island environments: The case of shifting cultivation in Vanuatu, Pacific*. *Agriculture, ecosystems & environment*, 174, 28-39.
- Blandón-Castaño, G., Dávila-Arias, M. T., & Rodríguez-Valencia, N. (1999). Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago, en proceso de lombricompostaje. *Cenicafé*, 50(1), 5-23.
- Bockstael, N., R. Costanza, I. Strand, W. Boynton, K. Bell, and L. Wainger. 1995. Ecological economic modeling and valuation of ecosystems. *Ecological Economics* 14:143–159.
- Bonaudo, T., Bendahan, A. B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., ... & Tichit, M. (2014). Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy*, 57, 43-51.
- Bravo-Medina, C., Marín, H., Marrero-Labrador, P., Ruiz, M. E., Torres-Navarrete, B., Navarrete-Alvarado, H., ... & Changoluisa-Vargas, D. (2017). Evaluación de la sustentabilidad mediante indicadores en unidades de producción de la provincia de Napo, Amazonia Ecuatoriana. *Bioagro*, 29(1), 23-36.
- Bravo-Monroy, L., Potts, S. G., & Tzanopoulos, J. (2016). Drivers influencing farmer decisions for adopting organic or conventional coffee management practices. *Food policy*, 58, 49-61.
- Brundtland, G. H. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. PNUMA.
- Bustamante, J., Casanova, A., Numa, R., & Monterrey, C. (2004). Estimación temprana del potencial de rendimiento en café (*Coffea arabica* L.) Var. Bramón I. *Bioagro*, 16(1), 3-8.
- Calvet-Mir, L., Gómez-Bagethun, E., & Reyes-García, V. (2012). Beyond food production: Ecosystem services provided by home gardens. A case study in Vall Fosca, Catalan Pyrenees, Northeastern Spain. *Ecological Economics*, 74, 153-160.
- Camacho-Valdez, V., & Ruiz-Luna, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4).
- Cao, S., Xie, G., & Zhen, L. (2010). Total embodied energy requirements and its decomposition in China's agricultural sector. *Ecological Economics*, 69(7), 1396-1404.
- Cardona, D. A., & Sadeghian, S. (2006). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar.
- Cardona, C. M., & Ochoa, B. C. (2013). La huella hídrica un indicador de impacto en el uso del agua. *Tecnogestión*, 10(1).

- Cardona, L. L. (2013). Generación de relevo y decisiones de inversión en fincas cafeteras en el departamento de Caldas–Colombia. *Sociedad y Economía*, (24), 263-285.
- Cardona, D. A., & Sadeghian, S. (2013). *Aporte de material orgánico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrío de guamo*.
- Caro-Caro, C. I., & Torres-Mora, M. A. (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: aplicación en agroecosistemas. *Orinoquia*, 19(2), 237-252.
- Casanova, L., Martínez, J., López, S., & López, G. (2016). De von Bertalanffy a Luhmann: Deconstrucción del concepto “agroecosistema” a través de las generaciones sistémicas. *Revista Mad*, (35), 60-74.
- Casimiro-Rodríguez, L. (2016). Bases metodológicas para la resiliencia socioecológica de fincas familiares en Cuba.
- Castiblanco, C. (2007). La economía ecológica: una disciplina en busca de autor. *Gestión y Ambiente*, 10(3), 07-22.
- Castillo, R. M. (2011). Agroecología: atributos de sustentabilidad. *InterSedes*, 3(5).
- Castro, N. M. C. (2017). Perspectivas para Agregación de Valor al Café de Nariño. *Libros Editorial UNIMAR*.
- Ceccon, E. (2008). tragedia en dos actos La revolución verde. *Ciencias*, 1(91), 21-29.
- CEPAL. (2007). Oportunidades y riesgos del uso de la bioenergía para la seguridad alimentaria en América Latina y el Caribe.
- Cepeda-Valencia, J., Gómez, D. P., & Nicholls, C. (2014). La estructura importa: abejas visitantes del café y estructura agroecológica principal (EAP) en cafetales/The structure matters: bees visitors of coffee flowers and agroecological main structure (MAS). *Revista Colombiana de Entomología*, 40(2), 241.
- Cerdán, C. R., Rebolledo, M. C., Soto, G., Rapidel, B., & Sinclair, F. L. (2012). Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems*, 110, 119-130.
- Cesano, D., & Obermaier, M. (2014). Mejorando la capacidad de adaptación de los pequeños agricultores en regiones semiáridas.
- Céspedes Restrepo, J. D., Arboleda Díaz, C., & Morales Pinzón, T. (2010). Aspectos determinantes de la seguridad alimentaria para fincas tipo en el municipio de Alcalá. Un análisis desde la dinámica de sistemas. *Scientia et technica*, 16(45).
- Chandra, A., Saradhi, P. P., Rao, K. S., Saxena, K. G., & Maikhuri, R. K. (2011). An investigation into the energy use in relation to yield of traditional crops in central Himalaya, India. *Biomass and bioenergy*, 35(5), 2044-2052.
- Chen, G. Q., Jiang, M. M., Chen, B., Yang, Z. F., & Lin, C. (2006). Emergy analysis of Chinese agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115(1), 161-173.
- Chiappe, M. (2002). Dimensiones sociales de la agricultura sustentable. *Agroecología: El camino para una agricultura sustentable*, 83-98.
- CIFOR C&I Team. (2000). *Ensemble générique des critères et indicateurs du CIFOR* (No. Manuels de critères et indicateurs pour la gestion durable des forêts (C&I Toolbox Series) no. 2, p. 59p). CIRAD-Foret and CIFOR, Montpellier, France.

- Cleves-Leguizamo, J. A., Toro-Calderón, J., Martínez-Bernal, L. F., & León-Sicard, T. (2017). La Estructura Agroecológica Principal (EAP): novedosa herramienta para planeación del uso de la tierra en agroecosistemas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(2), 441-449.
- Common, M. S., & Stagl, S. (2008). *Introducción a la economía ecológica*. Reverté.
- Conway, G. R. (1986). *Agroecosystem analysis for research and development*. Bangkok: Winrock International Institute for Agricultural Development.
- Córdoba-Vargas, C. A. (2017). *Resiliencia y variabilidad climática en agroecosistemas cafeteros en Anolaima (Cundinamarca-Colombia)* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá).
- Costanza, R., & Daly, H. E. (1992). Natural capital and sustainable development. *Conservation biology*, 6(1), 37-46.
- Costanza, R., & Folke, C. (1997). Valuing ecosystem services with efficiency, fairness and sustainability as goals. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*, 49-70.
- Costanza, R., & Patten, B. C. (1995). Defining and predicting sustainability. *Ecological Economics*, 15(3), 193-196.
- Costanza, R. (1997). La economía ecológica de la sostenibilidad. Invertir en capital natural. *Medio ambiente y desarrollo sostenible. Más allá del informe Brundtland*. Editorial Trotta. Madrid, 103-114.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Raskin, R. G. (1998). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological economics*, 25(1), 3-16.
- Dai, J., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., & Ahmad, B. (2015). Sustainability-based economic and ecological evaluation of a rural biogas-linked agro-ecosystem. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 347-355.
- Daily, G. (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press
- Dale, V. H., & Polasky, S. (2007). Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological economics*, 64(2), 286-296.
- Dana, G. V., Kapuscinski, A. R., & Donaldson, J. S. (2012). Integrating diverse scientific and practitioner knowledge in ecological risk analysis: A case study of biodiversity risk assessment in South Africa. *Journal of environmental management*, 98, 134-146.
- Daniels, S., Witters, N., Beliën, T., Vrancken, K., Vangronsveld, J., & Van Passel, S. (2017). Monetary Valuation of Natural Predators for Biological Pest Control in Pear Production. *Ecological Economics*, 134, 160-173.
- Dávila, M. T., & Ramírez, C. A. (1996). Lombricultura en pulpa de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 225(1).
- De Groot, R. S. (1992). *Functions of nature: evaluation of nature in environmental planning, management and decision making*. Wolters-Noordhoff BV.
- De Groot, R., van der Perk, J., Chiesura, A., & Marguliew, S. (2000). Ecological functions and socioeconomic values of critical natural capital as a measure for ecological integrity and environmental health. In *Implementing ecological integrity* (pp. 191-214). Springer Netherlands.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408.

- De Molina, M. G., & Caporal, F. R. (2013). Agroecología y política. ¿Cómo conseguir la sustentabilidad? Sobre la necesidad de una agroecología política. *Agroecología*, 8(2), 35-43.
- De Schutter, O. (2010). Agroecology and the right to food. *United Nations. December*.
- De Souza, H. N., de Goede, R. G., Brussaard, L., Cardoso, I. M., Duarte, E. M., Fernandes, R. B. & Pulleman, M. M. (2012). Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146(1), 179-196.
- De Tezanos, A. (1998). Una etnografía de la etnografía. *Bogotá: Antropos*.
- Del Milenio, E. D. L. E. (2003). Ecosistemas y bienestar humano: marco para la evaluación. *Ginebra: World Resources Institute*.
- Dendoncker, N., Keune, H., Jacobs, S., & Gómez-Baggethun, E. (2014). Inclusive ecosystem services valuation. *Ecosystem Services: Global Issues, Local Practices*, 3-12.
- Dendoncker, N., Turkelboom, F., Boeraeve, F., Boerema, A., Broekx, S., Fontaine, C., ... & Janssens, L. (2018). Integrating Ecosystem Services values for sustainability? Evidence from the Belgium Ecosystem Services community of practice. *Ecosystem services*, 31, 68-76.
- Díaz-Gutierrez, K. E., & Orellana-Rodríguez, C. M. (2011). Determinación del impacto social, económico y ambiental que genera la interacción entre la zona agrícola y el área natural de Chaguantique, Municipio de Puerto el Triunfo, Departamento de Usulután (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).
- Díaz-Manrique, M. A. (2014). *Estudio de la variabilidad climática y los agroecosistemas cafeteros desde la dinámica de sistemas* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Dougill, A., Fraser, E., & Reed, M. (2010). Anticipating vulnerability to climate change in dryland pastoral systems: using dynamic systems models for the Kalahari. *Ecology and Society*, 15(2).
- Draper, N. R., & Smith, H. (2014). *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Duque, H., & Dussán, C. (2005). Productividad de la mano de obra en la cosecha de café en cuatro municipios de la región cafetera central de Caldas.
- Durán-Umaña, L., & Henríquez-Henríquez, C. (2006). Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense Vol. 31 Núm. 1 2006*.
- Echavarria, J. J., Villamizar-Villegas, M., & McAllister, D. (2016). Impacto del crédito sobre los productores de café en Colombia. *Versión Preliminar-Borradores de Economía, Banco de la República*.
- Espinoza, A. T., Camargo, M., Rincón, P., & Alfaro, M. (2017). Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: a bibliographic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 350-359.
- Espinosa-Álvarez, J. A., & Ríos-Osorio, L. A. (2016). Caracterización de sistemas agroecológicos para el establecimiento de cacao (*Theobroma cacao L.*), en comunidades afrodescendientes del Pacífico Colombiano (Tumaco-Nariño, Colombia). *Acta Agronómica*, 65(3), 211-217.
- Espinoza, A., Bautista, S., Narváez, P. C., Alfaro, M., & Camargo, M. (2017). Sustainability assessment to support governmental biodiesel policy in Colombia: A system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.168>.

- Espinoza-Núñez, L. O. (2017). *Evaluación de servicios ambientales de sistemas agroforestales con café (Coffea spp) y cacao (Theobroma cacao) en tres fincas del municipio El Tuma-La Dalia, Matagalpa* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria).
- Estrada, E. M., Garrido, F. E., & Costabeber, J. A. (2000). Proceso de ecologización y acción colectiva en la agricultura: El cooperativismo a la luz de las distintas experiencias de agricultura ecológica en Brasil y España. *Phytoma España: La revista profesional de sanidad vegetal*, (124), 20-24.
- Evia, G., & Sarandon, S. (2002). Aplicación del método multicriterio para valorar la sustentabilidad de diferentes alternativas productivas en los humedales de la Laguna Merín, Uruguay. *Agroecología: El camino para una agricultura sustentable. Ediciones Científicas Americanas, La Plata, Argentina*, 431-447.
- Fajardo Gómez, C. E. (2016). *Aproximación al manejo y uso de la biodiversidad en agroecosistemas del territorio colectivo del consejo comunitario el cedro (Chocó, Colombia) Un estudio de caso desde el enfoque agroecológico* (Master's thesis).
- Falconí, F., & Vallejo, M. C. (2012). Transiciones socioecológicas en la región andina. *Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica*, 18, 53-71
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, and Bioenergy and Food Security Criteria and Indicators project BEFSCI. 2007. "Classification , Certification and Standardization Including Lifecycle Assessments of Biofuels."
- FAO-IIASA 2000. Global Agroecological Zones. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model. Food and Agriculture Organization (online) V: 1.0. <http://www.fao.org>. (Fao and Agriculture Organization of the United States-International Institute for Applied Systems Analysis).
- Farber, S. C., Costanza, R., & Wilson, M. A. (2002). Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological economics*, 41(3), 375-392.
- Farfan, F., & Mestre, A. (2004). Respuesta del café cultivado en un sistema agroforestal a la aplicación de fertilizantes.
- Farfan, F., & Jaramillo, A. (2013). *Sombrío para el cultivo del café según la nubosidad de la región. Avances Técnicos Cenicafé (Colombia)* (no. 379) 8 p. 0120-0178.
- Farfan, F., & Sánchez, P. (2016). Densidad de siembra del café variedad Castillo en sistemas agroforestales en el departamento de Santander Colombia.
- Farfan, F., Baute, J. E., Sánchez, P. M., & Menza, H. D. (2013). Guamo santafereno en sistemas agroforestales con café. *Avances Técnicos Cenicafé (Colombia)* (no. 396) 8 p. 0120-0178.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2018), "Página institucional" recuperado de https://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/nuestro_cafe/cafes_especiales/que_son/
- Feres, J. C., & Villatoro, P. (2007). Un sistema de indicadores para el seguimiento de la cohesión social en América Latina. *CEPAL y Eurosocial Fiscal*.
- Ferraro, D. O. (2008). Evaluación exergética de la producción de etanol en base a grano de maíz: un estudio de caso en la Región Pampeana (Argentina). *Ecología austral*, 18(3), 323-336.
- Ferraro, D. O. (2009). Fuzzy knowledge-based model for soil condition assessment in Argentinean cropping systems. *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 359-370.

- Ferreira, A. V., Sánchez-Román, R. M., & Orellana, A. (2016). Temporal Dynamic Modeling for the Assessment of Water Availability and its Effects on Sustainability of Water Resources at Boi Branco Sub-basin, SP, Brazil.
- Figueroa-Lucero, O. A. (2016). Evaluación De La Sostenibilidad De Los Sistemas Producción De Café En Fincas-Hogar Del Sector San José, Municipio De Linares-Nariño¹. *Tendencias*, 17(2), 111-125.
- Finch, C. U., & Sharp, W. C. (1976). *Cover crops in California orchards & vineyards*. USDA Soil Conservation Service.
- Fischer-Kowalski, M., & Haberl, H. (Eds.). (2007). *Socioecological transitions and global change: Trajectories of social metabolism and land use*. Edward Elgar Publishing.
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological economics*, 68(3), 643-653.
- Foladori, G. (2001). La economía ecológica. *Sustentabilidad*, 189-195.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., ... & Balzer, C. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337.
- Fonseca, J. A., Jarma, A. D. J., & Cleves, J. A. (2014). La ecoagricultura y la agroecología como estrategia tecnológica que potencia los servicios ecosistémicos. una revisión. *Temas Agrarios*, 19(2), 260-275.
- Fonseca, O. D. D., Ariza, J. A. L., & Ortega, J. A. T. (2016). Determinación de la Huella Hídrica. *Publicaciones e Investigación*, 10, 39-46.
- Forrester, J. W. (1985). The" model versus a modeling "process. *System Dynamics Review*, 1(1), 133-134.
- Forrester, J. W., & Senge, P. M. (1996). Tests for building confidence in system dynamics models. *Modelling for management: simulation in support of systems thinking*, 2, 414-434.
- Forrester, J.W., 2013. Industrial Dynamics, Martino Fine Books.
- Foyer, J., Jankowski, F., Blanc, J., Georges, I., & Kleiche-Dray, M. (2014). Saberes científicos y saberes tradicionales en la gobernanza ambiental: La agroecología como práctica híbrida.
- Fu, S., Cabrera, M. L., Coleman, D. C., Kisselle, K. W., Garrett, C. J., Hendrix, P. F., & Crossley, D. A. (2000). Soil carbon dynamics of conventional tillage and no-till agroecosystems at Georgia Piedmont—HSB-C models. *Ecological Modelling*, 131(2), 229-248.
- Fréguin-Gresh, S., Baranger, M., Rapidel, B., & Le Coq, J. F. (2015). Servicios ecosistémicos, estrategias productivas agroforestales y relaciones sociales en un territorio de Nicaragua.
- Funes-Monzote, F. R., Martín, G. J., Suárez, J., Blanco, D., Reyes, F., Cepero, L., ... & Cala, M. (2011). Evaluación inicial de sistemas integrados para la producción de alimentos y energía en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 34(4), 445-462.
- Galán, Á. L., & Pérez, A. L. (2012). Nuevos índices para evaluar la agrobiodiversidad. *Agroecología*, 7(1), 109-115.
- Garay, D. L., & Fernández, F. G. (2014). Reconocimiento del estado actual del paisaje del municipio de Gutiérrez (Cundinamarca), mediante el uso de indicadores de ecología del paisaje. *Revista de Tecnología*, 13(1), 63-72.

- García, T. R. (2000). La Agroecología: ciencia, enfoque y plataforma para su desarrollo rural sostenible y humano. *Revista "AGROECOLOGÍA", Ed. LAV, junio.*
- Garbach, K., & Morgan, G. P. (2017). Grower networks support adoption of innovations in pollination management: The roles of social learning, technical learning, and personal experience. *Journal of Environmental Management*, 204, 39-49.
- Georgescu-Roegen, N. (1983), 'La teoría energética del valor económico: un sofisma económico particular', *El Trimestre Económico*, 198, 829-834.
- Georgescu-Roegen, N. (1996). *La ley de la entropía y el proceso económico*. Visor.
- Gilbert, N. (2004). *Agent-based social simulation: dealing with complexity* (pp. 1-14). Publisher not identified.
- Gillison, A., Liswanti, N., Budidarsono, S., Van Noordwijk, M., & Tomich, T. (2004). Impact of cropping methods on biodiversity in coffee agroecosystems in Sumatra, Indonesia. *Ecology and Society*, 9(2).
- Giraldo-Betancur, P. C., & Salinas-Mejía, J. A. (2009). Aplicación del modelo de sistemas de producción y medios de vida a un caso rural del departamento de Risaralda. *Revista Luna Azul*, (28).
- Gliessman, S. R., Engles, E., & Krieger, R. (1998). *Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture*. CRC Press.
- Gliessman, S. R. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE.
- Gliessman, S. R., Guadarrama-Zugasti, C., Mendez, V. E., Trujillo, L., Bacon, C., & Cohen, R. (2004). Agroecología: un enfoque sustentable de la agricultura ecológica. *Universidad Internacional de Andalucía, Sevilla, Spain*.
- Gliessman, S. R., Rosado-May, F. J., Guadarrama-Zugasti, C., Jedlicka, J., Cohn, A., Méndez, V. E., ... & Jaffe, R. (2007). Agroecología: promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Revista Ecosistemas*, 16(1).
- Gliessman, S. R. (2013). Agroecología: Plantando las raíces de la resistencia. *Agroecología*, 8(2), 19-26.
- Godoy, L., & Bartó, C. (2002). Validación y valoración de modelos en la Dinámica de Sistemas. *Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería*, 5, 31-47.
- Gómez, L., Vargas, E., & Posada, L. (2007). Economía ecológica. Bases fundamentales. *Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Estudios Ambientales*, 23-24.
- Gómez, L. F., Ríos-Osorio, L., & Eschenhagen, M. L. (2015). Las bases epistemológicas de la agroecología. *Agrociencia*, 49(6), 679-688.
- Gómez, L. F., Osorio, L. A. R., & Durán, M. L. E. (2015). El concepto de sostenibilidad en agroecología. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 18(2).
- Gómez-Baggethun, E., & De Groot, R. (2007). Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Revista Ecosistemas*, 16(3).
- Gómez-Baggethun, E. and R. De Groot (2010), 'Natural capital and ecosystem services: the ecological foundation of human society', in R. E. Hester and R. M. Harrison (eds), *Ecosystem Services: Issues in Environmental Science and Technology*, Cambridge: Royal Society of Chemistry, pp. 105 - 121.

- Gómez-Baggethun, E., Martín-López, B., Barton, D., Braat, L., Saarikoski, H., Kelemen, E., ... & Potschin, M. (2014). State of the art report on integrated valuation of ecosystem services. *EU FP7 OpenNESS Project Deliverable*, 4.
- Gómez-Baggethun, E., & Martín-López, B. (2015). 11. Ecological economics perspectives on ecosystem services valuation. *Handbook of Ecological Economics*, 260.
- Gómez-Montoya, H. (2015). Ventajas y desventajas de la certificación con sellos de calidad para la producción café. Caso de estudio San Francisco, Cundinamarca.
- Gómez, U. E., Andrade, H. H., & Vásquez, C. A. (2015). Lineamientos Metodológicos para construir Ambientes de Aprendizaje en Sistemas Productivos Agropecuarios soportados en Dinámica de Sistemas. *Información tecnológica*, 26(4), 125-136.
- González-Esquivel, C. E., Ríos-Granados, H., Brunett-Pérez, L., Zamorano-Camiro, S., & Villa-Méndez, C. I. (2006). ¿Es posible evaluar la dimensión social de la sustentabilidad? Aplicación de una metodología en dos comunidades campesinas del valle de Toluca, México. *Convergencia*, 13(40), 107-139.
- Goodland, R. (1995). The concept of environmental sustainability. *Annual review of ecology and systematics*, 26(1), 1-24.
- Goodland, R., & Daly, H. (1996). Environmental sustainability: universal and non-negotiable. *Ecological applications*, 6(4), 1002-1017.
- Güldner, D., & Krausmann, F. (2017). Nutrient recycling and soil fertility management in the course of the industrial transition of traditional, organic agriculture: The case of Bruck estate, 1787–1906. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 249, 80-90.
- Gutiérrez Cedillo, J. G., Aguilera Gómez, L. I., & González Esquivel, C. E. (2008). Agroecología y sustentabilidad. *Convergencia*, 15(46), 51-87.
- Gutiérrez González, P., Suárez Alonso, M., & Vidal-Abarca Gutiérrez, M. R. (2016). Analizando los servicios ecosistémicos desde la historia socio-ecológica: El caso de la Huerta de Murcia. *Cuadernos Geográficos*, 55(1).
- Gutiérrez Urueña, C. L., & Quintero Zuluaga, A. P. (2017). Evaluación del Plan Departamental de Agua de Caldas periodo 2009 a 2015.
- Guzmán Casado, G. I., & Alonso Mielgo, A. M. (2007). La investigación participativa en agroecología: una herramienta para el desarrollo sustentable. *Ecosistemas*, Vol. 16, n. 1 (en.-abr. 2007); pp. 24-36.
- Guzmán, E. S., & Woodgate, G. (2013). Agroecología: Fundamentos del pensamiento social agrario y teoría sociológica. *Agroecología*, 8(2), 27-34.
- Guzmán, C. M. M. (2015). La sostenibilidad del paisaje cultural cafetero como patrimonio cultural de la humanidad: una mirada desde los procesos de hibridación en la cultura cafetera. *Sinapsis*, 7(7), 73-84.
- Hacking, T., & Guthrie, P. (2008). A framework for clarifying the meaning of Triple Bottom-Line, Integrated, and Sustainability Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(2), 73-89.
- Halog, A., & Manik, Y. (2011). Advancing integrated systems modelling framework for life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 3(2), 469-499.

Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

- Hanna, S. H. S., Osborne-Lee, I. W., Cesaretti, G. P., Misso, R., & Khalil, M. T. (2016). Ecological Agro-ecosystem Sustainable Development in Relationship to Other Sectors in the Economic System, and Human Ecological Footprint and Imprint. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8, 17-30.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontología Electrónica* 4(1): 9pp.
- Harrington, L. W. (1992). Measuring sustainability: issues and alternatives.
- Harris, J. M. (2003). Sustainability and Sustainable Development. Internet Encyclopedia of Ecological Economics. International Society for Ecological Economics.
- Hazell, P. B. R. (Ed.). (2009). *Bioenergía y agricultura: Promesas y retos* (Vol. 14). Intl Food Policy Res Inst.
- Heredia, Q., & Maribel, R. (2013). Influencia de cuatro métodos de beneficio sobre la calidad física y organoléptica del café arábigo (*Coffea arabica* L.) en dos pisos altitudinales del noroccidente de Pichincha.
- Hernández, E., García, J., & Díaz, G. M. (1977). El agroecosistema: Concepto central en el análisis de la enseñanza, la investigación y la educación agrícola en México. *Agroecosistemas de México: contribuciones a la enseñanza, investigación y divulgación agrícola* (pp. XI-XIX) Chapingo Méx.: Colegio de Postgraduados.
- Hoffmann, D., & Oetting, I. (2010). El cambio climático y las áreas protegidas de Bolivia. *Biodiversidad y Ecología en Bolivia*.
- Hoffmann, D. (2017). Los ecosistemas de montaña. *Las montañas en la agroecología y la alimentación*, 33(1), 19.
- Hornborg, A., McNeill, J. R., & Alier, J. M. (Eds.). (2007). *Rethinking environmental history: world-system history and global environmental change*. Rowman Altamira.
- Hossain, M. S., Eigenbrod, F., Amoako Johnson, F., & Dearing, J. A. (2017). Unravelling the interrelationships between ecosystem services and human wellbeing in the Bangladesh delta. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 24(2), 120-134.
- Hoyos, J. F. S. (2002). Manual para el diseño y gestión de pequeños sistemas de riego por aspersión en laderas. Cusco, Peru: MASAL.
- IAD, I. de l'Agriculture durable, 2017. Fiche technique de calcul des indicateurs.
- Iermanó, M. J., Sarandón, S. J., Tamagno, L. N., & Maggio, A. D. (2015). Evaluación de la agrobiodiversidad funcional como indicador del “potencial de regulación biótica” en agroecosistemas del sudeste bonaerense. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 114(3), 1-14.
- Infante, A., & Infante, F. (2013). Percepciones y estrategias de los campesinos del Secano para mitigar el deterioro ambiental y los efectos del cambio climático en Chile. *Agroecología*, 8(1), 71-78.
- Informes de gestión de la Federación de Cafeteros de Caldas (2018), “Página institucional” recuperado de https://caldas.federaciondecafeteros.org/fnc/nuestros_informes/category/118
- Iniesta Arandia, I. (2015). El agua que no duerme: Una aproximación socio-ecológica a los sistemas de regadío rurales en dos cuencas hidrográficas del sureste semi-árido andaluz.

- Izquierdo, L. R., Ordax, J. M. G., Santos, J. I., & Martínez, R. D. O. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empíria. Revista de metodología de ciencias sociales*, (16), 85-112.
- Jabbar, R., Zwickle, S., Gallandt, E. R., McPhee, K. E., Wilson, R. S., & Doohan, D. (2014). Mental models of organic weed management: Comparison of New England US farmer and expert models. *Renewable agriculture and food systems*, 29(4), 319-333.
- Jacobs, S., Dendoncker, N., Martín-López, B., Barton, D. N., Gomez-Bagethun, E., Boeraeve, F., ... & Pipart, N. (2016). A new valuation school: Integrating diverse values of nature in resource and land use decisions. *Ecosystem Services*, 22, 213-220.
- Jacobs, S., Martín-López, B., Barton, D. N., Dunford, R., Harrison, P. A., Kelemen, E., ... & Kopperoinen, L. (2018). The means determine the end—Pursuing integrated valuation in practice. *Ecosystem services*, 29, 515-528.
- Jackson, W. (2002). Natural systems agriculture: a truly radical alternative. *Agriculture, ecosystems & environment*, 88(2), 111-117.
- Janzen, D. H. (1973). Tropical agroecosystems. *Science*, 182(4118), 1212-1219.
- Jaramillo-Robledo, A., & Chávez-Córdoba, B. (1999). Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé*, 50(2), 97-105.
- Jax, K., D. Barton, K. Chan, R., De Groot, U. Doyle, U. Eser, C. Görg, E. Gómez-Bagethun, Y. Griewald, W. Haber, R. Haines-Young, U. Heink, T. Jahn, H. Joosten, L. Kerschbaumer, H. Korn, G. Luck, B. Matzdorf, B. Muraca, C. Neßhöver, B. Norton, K. Ott, M. Potschin, F. Rauschmayer, C. von Haaren and S. Wichmann (2013), 'Ecosystem services and ethics', *Ecological Economics*, 93, 260–268.
- Jobbágy, E. G., Paruelo, J. M., & Laterra, P. (2011). Valoración de servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial.
- Jogo, W., & Hassan, R. (2010). Balancing the use of wetlands for economic well-being and ecological security: The case of the Limpopo wetland in southern Africa. *Ecological Economics*, 69(7), 1569-1579.
- Johansen, O. (1975). *Introducción a la teoría general de sistemas*. Univ. de Chile, Dpto. de Administración.
- Khalajabadi, S. S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. guía práctica. *Boletín técnico. Cenicafé*, (32).
- Kirsta, Y. B. (2006). System-analytical modelling—Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems. *Ecological modelling*, 191(3), 315-330.
- Kumar, P. (Ed.). (2010). *The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations*. UNEP/Earthprint.
- La-Roca, F. (2010). Identificación y valoración de servicios ecosistémicos: entre la innovación conceptual y la renovación cosmética. *Universitat de Valencia. Departament d'Economia Aplicada. froca@uv.es*.
- Lal, R. (2009). Sequestering carbon in soils of arid ecosystems. *Land Degradation & Development*, 20(4), 441-454.
- Laterra, P., Castellarini, F., & Orué, M. E. (2011). ECOSER: Un protocolo para la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su valor social. *Valoración de Servicios Ecosistémicos*:

conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA, Buenos Aires, 359-389.

Lecq, S., Loisel, A., Brischoux, F., Mullin, S. J., & Bonnet, X. (2017). Importance of ground refuges for the biodiversity in agricultural hedgerows. *Ecological Indicators*, 72, 615-626.

Leemans, R., & De Groot, R. S. (2003). *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Island Press.

Le Moigne, J. L. (1990). La modélisation des systèmes complexes. *Paris: Bordas, Dunot, 1990.*

Lee, S., Geum, Y., Lee, H., & Park, Y. (2012). Dynamic and multidimensional measurement of product-service system (PSS) sustainability: a triple bottom line (TBL)-based system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 32, 173-182.

Leyva, A., & Pohlan, J. (2005). Agroecología en el trópico: Ejemplos de Cuba. La biodiversidad vegetal, cómo conservarla y multiplicarla. *Agroecología en el trópico: Ejemplos de Cuba: La biodiversidad vegetal, cómo conservarla y multiplicarla.*

León, S. (2009). Agroecología: desafíos de una ciencia ambiental en construcción. León S., T., y MA Altieri (eds.). *Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, DC, 53-76.

León, T. (2014). Perspectiva ambiental de la agroecología: La ciencia de los agroecosistemas. In *IDEAS* (Vol. 23, pp. 151-211).

León, T., Mendoza, T., & Córdoba, C. (2014). La estructura agroecológica principal de la finca (Eap): un nuevo concepto útil en agroecología, 9, 55–66.

Lescourret, F., Magda, D., Richard, G., Adam-Blondon, A. F., Bardy, M., Baudry, J., ... & Martin-Clouaire, R. (2015). A social–ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 68-75.

Limburg, K.E., O'Neill, R.V., Costanza, R. y Farber, S. 2002. Complex systems and valuation. *Ecological Economics*, 41: 409-420.

Limin, Z., Jia, L., & Xueping, Z. (2011, February). Energy analysis and assessment of sustainability on the agro-ecosystem in Heilongjiang province: As a case of Xinglong town. In *Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2011 International Conference on* (pp. 176-179). IEEE.

Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61(3), 183-193.

Liu, Z., Wang, D. Y., Li, G., Ning, T. Y., Tian, S. Z., Hu, H. Y., & Li, Z. J. (2017). Cosmic exergy-based ecological assessment for farmland-dairy-biogas agroecosystems in North China. *Journal of Cleaner Production*, 159, 317-325.

Lomas, P. L., Martín, B., Louit, C., Montoya, D., Montes, C., & Álvarez, S. (2005). Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas. *Fundación Interuniversitaria Fernanda González Bernáldez. España.*

López, L. N. (2012). Biomasa y cantidad de carbono almacenado en Handroanthus heptaphyllus (Vell.) Mattos, en un sistema agroforestal con Ilex paraguariensis St. Hil. *Este volumen.*

- Lope-Alzina, D. G. (2014). Una red comunal de acceso a alimentos: el huerto familiar como principal proveedor de productos para intercambio en una comunidad Maya-Yucateca. *Gaia Scientia*, 8(2).
- López Báez, W., Herrera, P., Gonzalo, B., & Reynoso Santos, R. (2016). Diagnóstico de los Servicios Ecosistémicos en la Reserva de la Biosfera El Triunfo, Chiapas, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(34), 21-34.
- López-Cardona, L. (2013). Generación de relevo y decisiones de inversión en fincas cafeteras en el departamento de Caldas.
- López-Ridaura, S., Masera, O., & Astier, M. (2002). Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMIS framework. *Ecological indicators*, 2(1), 135-148.
- Lores, A., Leyva, A., & Tejeda, T. (2008). Evaluación espacial y temporal de la agrobiodiversidad en los sistemas campesinos de la comunidad "Zaragoza" en La Habana. *Cultivos Tropicales*, 29(1), 3-10.
- Louah, L., Visser, M., Blaimont, A., & de Cannière, C. (2017). Barriers to the development of temperate agroforestry as an example of agroecological innovation: Mainly a matter of cognitive lock-in?. *Land Use Policy*, 67, 86-97.
- Loucks, O. L. (1977). Emergence of research on agro-ecosystems. *Annual review of ecology and systematics*, 8(1), 173-192.
- Lucero, O. A. F. (2016). Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción de café en fincas-hogar del Sector San José, Municipio de Linares-Nariño. *Tendencias*, 17(2), 6.
- Luffiego García, M., & Rabadán Vergara, J. M. (2000). La evolución del concepto de sostenibilidad y su introducción en la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(3), 473-486.
- Ma, F., Eneji, A. E., & Liu, J. (2015). Assessment of ecosystem services and dis-services of an agro-ecosystem based on extended emergy framework: A case study of Luancheng county, North China. *Ecological Engineering*, 82, 241-251.
- Machado Vargas, M. M., Nicholls, C. I., Márquez, S. M., & Turbay, S. (2015). Caracterización de nueve agroecosistemas de café de la cuenca del río Porce, Colombia, con un enfoque agroecológico. *Idesia (Arica)*, 33(1), 69-83.
- Machado Vargas, M. M., & Ríos Osorio, L. A. (2016). Sostenibilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores: revisión sistemática. *Idesia (Arica)*, 34(2), 15-23.
- Malagón Manrique, R., & Prager Mosquera, M. (2001). *El enfoque de sistemas: Una opción para el análisis de las unidades de producción agrícola*. Universidad Nacional de Colombia.
- Manes, F., Incerti, G., Salvatori, E., Vitale, M., Ricotta, C., & Costanza, R. (2012). Urban ecosystem services: tree diversity and stability of tropospheric ozone removal. *Ecological Applications*, 22(1), 349-360.
- Martínez-Alier, J., G. Munda and J. O'Neill (1998), 'Weak comparability of values as a foundation for ecological economics', *Ecological Economics*, 26 (3), 277–286.
- Martínez-Alier, J., & Roca Jusmet, J. (2003). Economía ecológica y política ambiental. In *Textos de Economía*. Fondo de Cultura Económica.
- Martínez-Alier, J. (2003). *The Environmentalism of the poor: a study of ecological conflicts and valuation*. Edward Elgar Publishing.

Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

- Martínez-Alier, J. (2006). Los conflictos ecológico-distributivos y los indicadores de sustentabilidad. *Polis. Revista Latinoamericana*, (13).
- Martínez Castillo, R. (2002). Agroecología: atributos de sustentabilidad. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, 3(5).
- Márquez, G. (2002). Ecología y cultura: cambio ambiental, evolución biológica y evolución cultural. *Politeia*, 28, 41-56.
- Marten, G. G. (1988). Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment. *Agricultural systems*, 26(4), 291-316.
- Martín, J. A. H., & Osorio, Á. A. (2012). Efectos de la biodiversidad en el control biológico dentro de los agroecosistemas. *Revista Inventum*, (13), 30-35.
- Mateos-Maces, L., Castillo-González, F., Servia, J. L. C., Estrada-Gómez, J. A., & Livera-Muñoz, M. (2016). Manejo y aprovechamiento de la agrobiodiversidad en el sistema milpa del sureste de México. *Acta Agronómica*, 65(4), 413.
- Mejía-Naranjo, J. C. (2014). Eficacia de los huertos leñeros aplicados para las estufas eficientes en el municipio de Cocorná Oriente Antioqueño.
- Méndez, V. E., & Bacon, C. (2005). Medios de vida y conservación de la biodiversidad arbórea: las experiencias de las cooperativas cafetaleras en El Salvador y Nicaragua. *LEISA Revista de agroecología (Perú)*, 20(4), 27-30.
- Méndez, V. E., Bacon, C. M., & Cohen, R. (2013). La agroecología como un enfoque transdisciplinario, participativo y orientado a la acción. *Agroecología*, 8 (2), 9-18.
- Merino, J. F. (1986). Participación de las lombrices de tierra en el ciclo del nitrógeno, con énfasis en los sistemas agroforestales de Costa Rica. *Uniciencia*, 3(1), 119-124.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Minga, N. (2017). Agroecología: diálogo de saberes para una antigua y nueva propuesta para el campo. *Antropología Cuadernos de investigación*, (17).
- Mialhe, F., Becu, N., & Gunnell, Y. (2012). An agent-based model for analyzing land use dynamics in response to farmer behaviour and environmental change in the Pampanga delta (Philippines). *Agriculture, ecosystems & environment*, 161, 55-69.
- Michael J., Radzicki, and Taylor Robert A. 1997. Introduction to System Dynamics. Adapted fr. Vol. 1. U.S. Department of Energy's.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. 2012. *Política nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos*. República de Colombia. 134 p.
- Montagnini, F., Somarriba Chávez, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales.
- Moonen, A. C., & Barberi, P. (2008). Functional biodiversity: an agroecosystem approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 127(1), 7-21.

- Moore, A. M. S., Florez, A., & Grajeda, E. (2010). Evaluation of Education Programs Developed by the Public and Private Alliance between the Coffee Growers Committee of Caldas and the State Government of Caldas, Colombia. Final Report. *Academy for Educational Development*.
- Mora-Delgado, J. (2004). Tecnología, conocimiento local y evaluación de escenarios en sistemas de caficultura campesina en Puriscal, Costa Rica.
- Mora-Delgado, J., Ramírez, C., & Quirós Madrigal, O. (2006). Análisis beneficio-costo y cuantificación de la energía invertida en sistemas de caficultura campesina en Puriscal, Costa Rica. *Agronomía Costarricense Vol. 30 Núm. 2 2006*.
- Moraga, P. Q., Bolaños, I. R. T., Pilz, M., Munguía, R. H., Jürgen, A. H. P., Barrios, M., ... & Gamboa, W. M. (2012). Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan el rendimiento de café (*coffea arabica* L.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. *La Calera*, 11(17), 41-47.
- Morales, H., Coronato, F., Carvalho, S., Saravia, A., Schweitzer, A., Burlamaqui, A., & Tourrand, J. F. (2016). Building New Human–Natural Systems for Sustainable Pasture Management in South America. In *Building Resilience of Human-Natural Systems of Pastoralism in the Developing World* (pp. 177-208). Springer International Publishing.
- Moreno Clavijo, N., & Romero Jiménez, A. A. (2016). Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras.
- Musacchio, L. R., & Grant, W. E. (2002). Agricultural production and wetland habitat quality in a coastal prairie ecosystem: simulated effects of alternative resource policies on land-use decisions. *Ecological Modelling*, 150(1), 23-43.
- Munda, G. (2004). Métodos y procesos multicriterio para la evaluación social de las políticas públicas. *Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica*, 1, 31-45.
- Musango, J. K. (2012). *Technology assessment of renewable energy sustainability in South Africa* (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).
- Nainggolan, D., Termansen, M., Fleskens, L., Hubacek, K., Reed, M. S., de Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2012). What does the future hold for semi-arid Mediterranean agroecosystems? –Exploring cellular automata and agent-based trajectories of future land-use change. *Applied Geography*, 35(1), 474-490.
- Nair, P. K. R. (1984). Soil productivity aspects of agroforestry. *Science and Practice of Agroforestry (ICRAF)*.
- Naredo, J. M. (1994). Fundamentos de la economía ecológica. *F. Aguilera y V. Alcántara (Comps.), De la economía ambiental a la economía ecológica*, 231-252.
- National Research council. (2005). *Valuing ecosystem services: toward better environmental decision-making*. National academies Press.
- Nicholls, C. (2008). Bases agroecológicas para diseñar e implementar una estrategia de manejo de hábitat para control biológico de plagas. *Agroecología*, 1, 37-48.
- Nicholls, C., & Altieri, M. (2013). Agroecología y cambio climático. *Metodología para evaluar la resiliencia socio-ecológica en comunidades rurales*. Lima: Redagres.
- Nicholls, C. I., Altieri, M. A., & Vázquez, L. L. (2015). Agroecología: principios para la conversión y el rediseño de sistemas agrícolas. *Agroecología*, 10(1), 61-72.
- Nicholls, C. I., Henao, A., & Altieri, M. A. (2017). Agroecología y el diseño de sistemas agrícolas resilientes al cambio climático. *Agroecología*, 10(1), 7-31.

- Nieto Rodríguez, G. P. (2017). *Agrobiodiversidad y servicios ecosistémicos: una revisión de los componentes y prácticas de manejo* (Master's thesis).
- Nodari, R. O., & Guerra, M. P. (2015). Agroecología: estrategias de pesquisa e valores. *estudos avançados*, 29(83), 183-207.
- Nodari, R. O., & Tomás, D. F. (2016). Agrobiodiversidad y desarrollo sostenible: La conservación IN SITU puede asegurar la seguridad alimentaria. *Biocenosis*, 24(1-2).
- Norgaard, R.B. 2010. Ecosystem services: From eye-opening metaphor to complexity blinder. *Ecological Economics* 69(6), 1219–1227.
- Norton, B. (1992). Sustainability, human welfare and ecosystem health. *Environmental values*, 1(2), 97-111.
- Odum, E. (1980). La Diversidad como función del flujo de energía. *Conceptos unificadores en ecología. Edit. Blume Barcelona-España*.
- Odum, H.T. (1996). Environmental Accounting: Emergy and Decision Making, 1st ed. John Wiley e Sons Inc., New York, pp. 1–370.
- Oliveros, C. E., Sanz, J. R., Ramírez, C. A., & Peñuela, A. E. (2013). Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0380.pdf>
- Ospina, O., Duque, H., & Farfán, F. (2004). Análisis económico de la producción de fincas cafeteras convencionales y orgánicas en transición en el departamento de Caldas.
- Osorio, F. A., Aramburo, S. A., & Morales, Y. O. (2011). Simulación de Estrategias de Inversión para Pequeños Caficultores Colombianos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 64(2).
- Osorio-González, J. (2015). Imitando el bosque: experiencia de diseño y desarrollo de un bosque comestible y un agroecosistema familiar en Aranzazu, Colombia. V Congreso Latinoamericano de agroecología-SOCLA (7 al 9 de octubre de 2015, La Plata).
- Ostrom, E. (2000). Collective action and the evolution of social norms. *Journal of economic perspectives*, 14(3), 137-158.
- Oteros-Rozas, E., Martín-López, B., González, J. A., Plieninger, T., López, C. A., & Montes, C. (2013). Socio-cultural valuation of ecosystem services in a transhumance social-ecological network. *Regional Environmental Change*, 14(4), 1269-1289.
- Paleologos, M. F., Pereyra, P. C., Sarandón, S. J., & Cicchino, A. C. (2015). El rol de los ambientes semi-naturales en la abundancia y diversidad de coleópteros edáficos en los viñedos de la Costa de Berisso, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 114(3), 74-84.
- Paleologos, M. F., Iermanó, M. J., Blandi, M. L., & Sarandón, S. J. (2017). Las relaciones ecológicas: un aspecto central en el rediseño de agroecosistemas sustentables, a partir de la agroecología. *Redes*, 22(2), 92-115.
- Panzieri, M., Marchettini, N., & Hallam, T. G. (2000). Importance of the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis for the sustainability of a soybean cultivation. *Ecological Modelling*, 135(2), 301-310.
- Parada-Sanabria, P. J. (2017). Práctica social y cultural del campesinado cafetero en cuatro municipios de Caldas (Colombia). *Revista Colombiana de Sociología*, 40, 193-212.

- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., ... & Maris, V. (2017). Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26, 7-16
- Patel R. 2010. Stuffed and starved: Markets, power and the hidden battle for the world's food system. New York: Harper Collins.
- Patten, B. C. (2010). Natural ecosystem design and control imperatives for sustainable ecosystem services. *Ecological Complexity*, 7(3), 282-291.
- Pearson, C. J., & Ison, R. L. (1997). *Agronomy of grassland systems*. Cambridge University Press.
- Peñaloza, H. A. B. (2014). Determinantes del ciclo de crédito en los municipios cafeteros de Colombia. *Sinapsis*, 6(6), 195-208.
- Peyraud, J. L., Taboada, M., & Delaby, L. (2014). Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: a review. *European journal of agronomy*, 57, 31-42.
- Pérez, B., González, C., & García, L. (2005). Evaluación de la sustentabilidad de dos agroecosistemas campesinos de producción de maíz y leche, utilizando indicadores. *Livestock Res. Rural Dev*, 17(7).
- Pérez, N., González, E., & Muñoz, E. (2015). Aportes de la agricultura familiar. *Revista de Protección Vegetal*, 30, 166-166.
- Pérez-Nieto, J., Valdés-Velarde, E., & Ordaz-Chaparro, V. M. (2012). Cobertura vegetal y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Terra Latinoamericana*, 30(3), 249-259.
- Pérez, M. A., Navarro, H., & Miranda, E. (2013). Residuos de plaguicidas en hortalizas: problemática y riesgo en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29.
- Pérez, J. M., Pulgarín, J. A., Loaiza, M. A., Restrepo, E. M., Quintero, G. P., & Tascón, C. O. (2008). Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. Av. Técnicos, 370, 8. <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/358/1/avt0370.pdf>
- Pérez-Sánchez, A. F., Rosique, J., Turbay, S., & Machado, M. (2016). Estudio de la seguridad alimentaria y nutricional de unidades campesinas productoras de café en rediseño agroecológico (cuenca del río Porce, Antioquia). *Agroalimentaria*, 22(42).
- Perfecto, I., Vandermeer, J. H., & Wright, A. L. (2009). *Nature's matrix: linking agriculture, conservation and food sovereignty*. Earthscan.
- Pimentel, D., Hurd, L. E., Bellotti, A. C., Forster, M. J., Oka, I. N., Sholes, O. D., & Whitman, R. J. (1973). Food production and the energy crisis. *Science*, 182(4111), 443-449.
- Pirachicán-Avila, E. (2015). *Autonomía alimentaria en sistemas agrícolas ecológicos y convencionales en Anolaima (Cundinamarca)* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá).
- Pizzigallo, A. C. I., Granai, C., & Borsa, S. (2008). The joint use of LCA and emergy evaluation for the analysis of two Italian wine farms. *Journal of Environmental Management*, 86(2), 396-406.
- Plantier-Santos, C., Carollo, C., & Yoskowitz, D. W. (2012). Gulf of Mexico Ecosystem Service Valuation Database (GeoServ): Gathering ecosystem services valuation studies to promote their inclusion in the decision-making process. *Marine Policy*, 36(1), 214-217.
- Plaza, E. H. (2013). La conservación de la biodiversidad en los sistemas agrarios. *Revista Ecosistemas*, 22(1), 1-4.

- Poroma-Colmena, D. (2012). *Huella de carbono y estrategias de reducción en el ciclo de vida de la producción del cacao (*Theobroma cacao L.*) en Waslala, Nicaragua* (No. Thesis P836e). CATIE.
- Portela, M. (2001). Measuring skill: a multi-dimensional index. *Economics Letters*, 72(1), 27-32.
- Portela, R., & Rademacher, I. (2001). A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. *Ecological Modelling*, 143(1), 115-146.
- Power, A. G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 365(1554), 2959-2971.
- Pret JN (1994) Regenerating agriculture. Earthscan Publications Ltd., London.320 pp
- Qudrat-Ullah, H., & Seong, B. S. (2010). How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model. *Energy policy*, 38(5), 2216-2224.
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2012). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for sustainable development*, 32(1), 273-303.
- Reijntjes, C., Haverkort, B., & Waters Bayer, A. (1992). *Farming for the future: an introduction to low-external-input and sustainable agriculture*. Macmillan.
- Reinoso, P. L. G., Durango, E. A. M., & Sandoval, G. L. (2011). Análisis espacial y temporal del índice de escasez de agua en la cuenca del río Quindío. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 22, 70-citation_lastpage.
- Ricou, C., Schneller, C., Amiaud, B., Plantureux, S., & Bockstaller, C. (2014). A vegetation-based indicator to assess the pollination value of field margin flora. *Ecological Indicators*, 45, 320-331.
- Rincón Ruiz, A., Echeverry-Duque, M. A., Piñeros, Q., Milena, A., Tapia Caicedo, C., David Drews, A., ... & Zuluaga Guerra, P. A. (2015). Integrated valuation of Biodiversity and ecosystem services: conceptual and methodological aspects.
- Rodríguez, E., Peche, R., Garbisu, C., Gorostiza, I., Epelde, L., Artetxe, U., ... & Etxebarria, J. (2016). Dynamic Quality Index for agricultural soils based on fuzzy logic. *Ecological Indicators*, 60, 678-692.
- Rodríguez, S. R. N. (2015). Economía, agricultura ecológica y agroecología. *BAETICA*, 1(19).
- Rodríguez, R. M. S., Ropero, M. C. G., & Armbrecht, I. (2016). Hormigas asociadas a nectarios extraflorales de árboles de dos especies de Inga en cafetales de Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 65(1), 9-15.
- Rodríguez, N., & Zambrano, D. A. (2013). *Los subproductos del café: fuente de energía renovable*.
- Rosales-Martínez, V., Martínez-Dávila, J. P., & Galicia-Galicia, F. (2015). Cambios en la estructura y el funcionamiento de los agroecosistemas por migración familiar en Jamapa, Veracruz, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(1), 59-70.
- Rosero, P. Y. G., Sánchez, S. A. M., & Narváez, I. E. P. (2015). Caracterización física de café especial (*Coffea Arabica*) en el municipio de Chachagüí (Nariño, Colombia). *Revista Lasallista de Investigación*, 12(1).

- Rositano, F., & Ferraro, D. O. (2014). Ecosystem services provided by agroecosystems: A qualitative and quantitative assessment of this relationship in the Pampa region, Argentina. *Environmental management*, 53(3), 606-619.
- Rositano, F. (2015). *Sustentabilidad de los agroecosistemas pampeanos: Análisis cualitativo y cuantitativo de la provisión de servicios de los ecosistemas* (Doctoral dissertation, Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina).
- Rótolo, G. C., & Francis, C. (2008). Los servicios ecosistémicos en el “corazón” agrícola de Argentina. *Ediciones INTA*, 44.
- Rozo, A. G., & da Luz Reis, R. A. (2003). *Sistemas digitales: metodologías de diseño VLSI*. Uniandes, Fac. de Ingeniería, Depto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- Ruiz-Rosado, O. (2006). Agroecología: una disciplina que tiende a la transdisciplina. *Interciencia*, 31(2), 140-145.
- Ruiz, J. F. R. (2017). *Gestión del agua y resiliencia en los sistemas de riego tradicionales: una comparativa socio-ecológica entre los agroecosistemas del sureste español y los de México central* (Doctoral dissertation, Universidad de Granada).
- Russi, C., Gómez Perazzolli, A., & Andreoni, I. (2015). Indicadores de sustentabilidad para el “Parque de Actividades Agropecuarias” de Montevideo. In *V Congreso Latinoamericano de agroecología-SOCLA (7 al 9 de octubre de 2015, La Plata)*.
- Saarikoski, H., Mustajoki, J., Barton, D. N., Geneletti, D., Langemeyer, J., Gomez-Baggethun, E., ... & Santos, R. (2016). Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis: Comparing alternative frameworks for integrated valuation of ecosystem services. *Ecosystem Services*, 22, 238-249.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Sabourin, E., Patrouilleau, M. M., Le Coq, J. F., Vásquez, L., & Niederle, P. (2017). Políticas Públicas en favor de la agroecología en América Latina y el Caribe.
- Sadeghian, S., & González, H. (2012). Alternativas generales de fertilización para cafetales en la etapa de producción. *Avances Técnicos Cenicafé*, 424, 1-8.
- Salas, G., A Labrador Moreno, J., & Altieri, M. A. (2001). *Aspectos ecológicos de los sistemas agrícolas. Las dimensiones del desarrollo. Agroecología y desarrollo: aproximación a los fundamentos agroecológicos para la gestión sustentable de agrosistemas mediterráneos*. Universidad de Extremadura, Madrid (España).
- Salazar, A. H. (2013). Propuesta metodológica de medición de la resiliencia agroecológica en sistemas socio-ecológicos: un estudio de caso en Los Andes Colombianos. *Agroecología*, 8(1), 85-91.
- Salazar-Centeno, D. (2014). Nicaragua: potencial faro regional para el diseño y evaluación de agroecosistemas agroecológicos. *La Calera*, 13(20), 58-65.
- Sámano Rentería, M. A. (2013). La agroecología como una alternativa de seguridad alimentaria para las comunidades indígenas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(8), 1251-1266.
- Sánchez, Á., & Iván, D. (2016). *Evaluación de servicios ecosistémicos generados en la agricultura familiar agroecológica campesina (AFAC) del centro del departamento del Valle del Cauca* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira).

Valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas: contribuciones desde la economía ecológica

- Sánchez, G. P. Z., & Villegas, L. A. R. (2015). Uso, manejo y conservación de la agrobiodiversidad por comunidades campesinas afrocolombianas en el municipio de Nuquí, Colombia. *ETNOBIOLOGÍA*, 13(3), 5-18.
- Salamanca Gavidia, L. A. (2017). Evaluación de la producción de café bajo sombra con especies arbóreas en el municipio de pajarito.
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana.
- Salazar, F. (1985). Producción de leña y biomasa de Inga densiflora Benth en San Ramon, Costa Rica.
- Salazar, K., Arroyave, A., Mauricio Ovalle, A., Ocampo, O. L., Ramírez, C. A., & Eugenio Oliveros, C. (2016). Tiempos en la recolección manual tradicional de café. *Ingeniería Industrial*, 37(2), 114-126.
- Salembier, C., Elverdin, J. H., & Meynard, J. M. (2016). Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for sustainable development*, 36(1), 1.
- Sánchez, D. I. Á., Sánchez-Cárdenas, L. F., & Sánchez de Prager, M. (2015). Percepción de servicios ecosistémicos (SE) en dos mercados campesinos agroecológicos en Tuluá (Valle del Cauca, Colombia). In *V Congreso Latinoamericano de agroecología-SOCLA (La Plata, 2015)*.
- Sánchez, J. Á. A., & Muñoz, J. F. V. (2016). Valoración de los ecoservicios en los agroecosistemas españoles: un estado de la cuestión/Valuation of ecosystem services in the Spanish agroecosystems: a state of the question. *Observatorio Medioambiental*, 19, 165.
- Sánchez-Morales, P., Ocampo-Fletes, I., Parra-Inzunza, F., Sánchez-Escudero, J., María-Ramírez, A., & Argumedo-Macías, A. (2017). Evaluación de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en la región de Huamantla, Tlaxcala, México. *Agroecología*, 9, 111-122.
- Sarandón, S. J. (2002). Incorporando el enfoque agroecológico en las Instituciones de Educación Agrícola Superior: la formación de profesionales para una agricultura sustentable. *Agroecología e desenvolvimento rural sustentável*, 3(2), 40-48.
- Sarandón, S. J. (2010). Biodiversidad, agrobiodiversidad y agricultura sustentable. Análisis del Convenio sobre Diversidad Biológica. *León Sicard, TE y Altieri, M., Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones*, edit. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Sociedad Científica Latinoamericana de agroecología (SOCLA), Medellín, Colombia, 105-129.
- Sarandón, S. (2010). La Agroecología: Su rol en el logro de una agricultura sustentable. *Curso de agroecología y agricultura sustentable dictado en el CEPT*, 15.
- Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (2014). Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. *Colección libros de cátedra. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. Capítulo*, 5, 131-158.
- Sarandón, S. J., Zuluaga, M. S., Cieza, R., Janjetic, L., & Negrete, E. (2008). Evaluación de la sustentabilidad de sistemas agrícolas de fincas en Misiones, Argentina, mediante el uso de indicadores. *Agroecología*, 1, 19-28.
- Sayago Ortega, J. (2016). *Servicios ecosistémicos en cultivos de Coffea arabica L.: almacenamiento de carbono en la localidad de Arroyo de las Cañas Veracruz* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

- Schuh-Moore, A. M., Flórez, A., & Grajeda, E. (2010). Evaluación de los programas educativos desarrollados por la Alianza público-privada entre el Comité de Cafeteros de Caldas y el departamento de Caldas, Colombia. *Manizales: AED Academia para el Desarrollo Educativo*.
- Segura Bonilla, O., & Aguilar González, B. (2016). Estado del Arte en Metodologías de Valoración de los Servicios Ecosistémicos y el Daño Ambiental.
- Segura, M. A., & Andrade, H. J. (2012). Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Revista Luna Azul*, (35).
- Seppelt, R. (2000). Regionalised optimum control problems for agroecosystem management. *Ecological Modelling*, 131(2), 121-132.
- Sevilla, E. (2006). *De la sociología rural a la agroecología* (Vol. 1). Icaria Editorial.
- Siau, G. (1993). Aplicación del enfoque de sistemas en producción agropecuaria. *Sistemas en Producción Animal. Un enfoque agroecológico para el desarrollo rural sustentable*. CLADES, CET, 9-24.
- Shen, T. Y., Wang, W. D., Min, H. O. U., Guo, Z. C., Ling, X. U. E., & Yang, K. Z. (2007). Study on spatio-temporal system dynamic models of urban growth. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 27(1), 10-17.
- Shi, T., & Gill, R. (2005). Developing effective policies for the sustainable development of ecological agriculture in China: the case study of Jinshan County with a systems dynamics model. *Ecological Economics*, 53(2), 223-246.
- Shiva, V., Littlefield, A., & Gates, H. (1994). The violence of the Green Revolution.
- Sargent, R. G. (2009, December). Verification and validation of simulation models. In *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 winter* (pp. 162-176). IEEE. Sargent, R. G. (2013).
- Sijtsma, F. J., van der Heide, C. M., & van Hinsberg, A. (2013). Beyond monetary measurement: How to evaluate projects and policies using the ecosystem services framework. *Environmental Science & Policy*, 32, 14-25.
- Silva-Santamaría, L., & Ramírez-Hernández, O. (2017). Evaluación de agroecosistemas mediante indicadores de sostenibilidad en San José de las Lajas, provincia de Mayabeque, Cuba. *Revista Luna Azul*, (44), 120-152.
- Sosa-Fernández, V., López-Morgado, R., Toledo-Aceves, T., & Bárcenas-Pazos, G. (2017). Oportunidades de conservación del bosque de niebla a través del manejo alternativo: los agroecosistemas cafetaleros. *Agroproductividad*, 10(1).
- Solórzano, N., & Querales, D. (2010). Crecimiento y desarrollo del café (*Coffea arábica*) bajo la sombra de cinco especies arbóreas. *Revista Forestal Latinoamericana*, 25(1), 61-80.
- Spedding, C. R. (1982). *Sistemas Agrarios*. (ACRIBA, Ed.). Zaragoza.
- Speelman, E. N., & García-Barrios, L. E. (2010). Agrodiversity v. 2: an educational simulation tool to address some challenges for sustaining functional agrodiversity in agro-ecosystems. *Ecological Modelling*, 221(6), 911-918.
- Sterman, J. (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. McGraw-Hill.
- Stupino, S. A., Iermanó, M. J., Gargoloff, N. A., & Bonicatto, M. M. (2014). La biodiversidad en los agroecosistemas. *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas*

sustentables. Colección libros de cátedra. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. Capítulo, 5, 131-158.

Swagemakers, P., Domínguez García, M. D., Onofa Torres, A., Oostindie, H., & Groot, J. C. (2017). A Values-Based Approach to Exploring Synergies between Livestock Farming and Landscape Conservation in Galicia (Spain). *Sustainability*, 9(11), 1987.

Swart, R. J., Raskin, P., & Robinson, J. (2004). The problem of the future: sustainability science and scenario analysis. *Global environmental change*, 14(2), 137-146.

Sumner, D. R. (1982). Crop rotation and plant productivity. *CRC handbook of agricultural productivity*, 1, 273-313.

Sussman, J. (2012). Introduction to Engineering Systems, ESD.00 System Dynamics. Business.

Téllez, P., & J. Boshell. 2001: Escenarios actuales y posibles efectos del cambio climático sobre los balances hídricos agrícolas y el rendimiento de algunos cultivos en Colombia. *Meteorol. Colomb.* 4:103-115. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C.–Colombia.

The Global Food Security Index (2018), “Página institucional” recuperado de <https://foodsecurityindex.eiu.com/>

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.

Tischler, W. (1965). *Agrarökologie* (No. 630.2745). Jena, Germany: Gustav Fischer Verlag.

Tobasura, I., Moreno, F., Aya, S., & Mora, J. (2011). Productividad energética y financiera en fincas campesinas del departamento de Caldas. Tres estudios de caso. *Luna Azul* (34), 101 -112. Obtenido de http://www.replic.ch/files/6813/7527/8747/rk_kaffeeabfaelle_12_rodriguez.pdf

Tripathi, R. S., & Sah, V. K. (2001). Material and energy flows in high-hill, mid-hill and valley farming systems of Garhwal Himalaya. *Agriculture, ecosystems & environment*, 86(1), 75-91.

Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management. *Ecology letters*, 8(8), 857-874.

Tsonkova, P., Quinkenstein, A., Böhm, C., Freese, D., & Schaller, E. (2014). Ecosystem services assessment tool for agroforestry (ESAT-A): An approach to assess selected ecosystem services provided by alley cropping systems. *Ecological indicators*, 45, 285-299.

Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, J. I., Espinosa-Calderón, A., Turrent-Thompson, C., & Mejía-Andrade, H. (2017). Cambio climático y algunas estrategias agrícolas para fortalecer la seguridad alimentaria de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1727-1739.

Turner RK, Georgiou S, Fisher B. (2008). *Valuing Ecosystem Services: The Case of multi-functional wetlands*. London: Cromwell Press, 2008. 240.

UNEP/CDB/COP/5 (2000) The Biodiversity Agenda. Decisiones adoptadas por la conferencia de las partes en el convenio sobre la diversidad biológica en su quinta reunión. Apéndice. Nairobi, 15-26 de mayo 2000.

Valdivieso, C. (2011). Medición multidimensional de pobreza y el desarrollo humano. *Revista Desarrollo Humano*, 76, agosto.

- Vandermeer, J. (1989). *The ecology of intercropping*, Cambridge Univ. Press. Cambridge. UK.
- Vandermeer, J., & Perfecto, I. (1995). *Breakfast of biodiversity: the truth about rain forest destruction*. Institute for Food and Development Policy.
- Vandermeer, J. (1995). The ecological basis of alternative agriculture. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 26(1), 201-224.
- Vandermeer, J., & Perfecto, I. (2013). Tradiciones complejas: Intersección de marcos teóricos en la investigación agroecológica. *Agroecología*, 8(2), 55-63.
- Varela Pérez, M. V. (2010). *Evaluación de sistemas de producción agroecológicos incorporando indicadores de sostenibilidad en la sabana de Bogotá/Evaluation of agroecological production systems incorporating sustainability indicators into the savannah of Bogotá* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Vargas, S. L. G., & Lozano, M. T. P. (2009). Instrumentos de política para la gestión de servicios ecosistémicos en agroecosistemas cebolleros de la cuenca del río Otún, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, (58).
- Vargas, M. M. M., & Osorio, L. A. R. (2016). Sostenibilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores: revisión sistemática. *IDESIA (Chile)*, 34(2), 4.
- Vargas, C. A. C., & León, T. E. (2013). Resiliencia de sistemas agrícolas ecológicos y convencionales frente a la variabilidad climática en Anolaima (Cundinamarca-Colombia). *Agroecología*, 8(1), 21-32.
- Vásquez-Vela, A. L. M. (2014). Abundancia y biomasa de lombrices en sistemas agroforestales con café convencional y orgánico durante la época lluviosa en Turrialba, Costa Rica. *Valoración comparativa de la macrofauna de lombrices en sistemas agroforestales de café orgánico y convencional en contraste con cultivos en pleno sol y bosque, durante la época lluviosa y seca en Turrialba, Costa Rica*. Escuela de Posgrado. CATIE, Turrialba (Costa Rica).
- Vázquez, L. (2011). Cambio climático, incidencia de plagas y prácticas agroecológicas resilientes. *Innovación agroecológica, adaptación y mitigación del cambio climático*. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). La Habana.
- Vázquez, L. L., & Martínez, H. (2017). Propuesta metodológica para la evaluación del proceso de reconversión agroecológica. *Agroecología*, 10(1), 33-47.
- Velu, R. K. (Ed.). (2013). *Microbiological research in agroecosystem management*. Springer Science & Business Media.
- Vera, L., Gil, Z. N., & Benavides, P. (2008). Identificación de enemigos naturales de Hypothenemus hampei en la zona cafetera central colombiana.
- Vidal-Legaz, B., Martínez-Fernández, J., Picón, A. S., & Pugnaire, F. I. (2013). Trade-offs between maintenance of ecosystem services and socio-economic development in rural mountainous communities in southern Spain: a dynamic simulation approach. *Journal of environmental management*, 131, 280-297.
- Villegas-Palacio, C., Berrouet, L., López, C., Ruiz, A., & Upegui, A. (2016). Lessons from the integrated valuation of ecosystem services in a developing country: Three case studies on ecological, socio-cultural and economic valuation. *Ecosystem Services*, 22, 297-308.
- Viveros, D. D. D. (2007). Sistemas complejos y desarrollo territorial. Un enfoque para el desarrollo de la agroecología. *Revista brasileira de agroecología*, 2(2).

- Vicsek, T. (2002). Complexity: The bigger picture. *Nature*, 418(6894), 131-131.
- Wallace, K. J. (2007). Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological conservation*, 139(3), 235-246.
- Wadsworth, J. (1997). Análisis de sistemas de producción animal Tomo 1: Las bases conceptuales. *FAO animal production and health paper*.
- Wegner, G., & Pascual, U. (2011). Cost-benefit analysis in the context of ecosystem services for human well-being: A multidisciplinary critique. *Global Environmental Change*, 21(2), 492-504.
- Were, K.O., Tien, B.D., Dick, Ø.B., Singh, B.R., (2017). A novel evolutionary genetic optimization-based adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS predict and map soil organic carbon stocks across an Afromontane landscape. *Pedosphere* 27, 877–889. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60461-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60461-2)
- Wezel, A., & Soldat, V. (2009). A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline of agroecology. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7(1), 3-18.
- Wilson, E. (2001). O. 1992. The diversity of life. *New York und London*.
- Willaarts, B. A., Volk, M., & Aguilera, P. A. (2012). Assessing the ecosystem services supplied by freshwater flows in Mediterranean agroecosystems. *Agricultural Water Management*, 105, 21-31.
- Winkler, K. J., & Nicholas, K. A. (2016). More than wine: cultural ecosystem services in vineyard landscapes in England and California. *Ecological Economics*, 124, 86-98.
- Wu, X., Wu, F., Wu, J., & Sun, L. (2015). Energy-Based Sustainability Assessment for a Five-in-One Integrated Production System of Apple, Grass, Pig, Biogas, and Rainwater on the Loess Plateau, Northwest China. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 39(6), 666-690.
- Yong, A. (2010). La biodiversidad florística en los sistemas agrícolas. *Cultivos Tropicales*, 31(4), 00-00.
- Zhang, Y., Sa, L., Xiong, F., Cheng, B., & Zhu, L. (2008). An Agent Based Model for Agro-ecosystem. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 9564-9568.
- Zoebl, D. (2000). Patterns of input–output relations in agro-ecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 79(2), 233-244.
- Zuo-fang, Y. A. O., LIUXing-tu, L. I., Fei, Y. A. N. G., Li, S. U. N., & Bo-long, W. E. N. (2009). Analysis of agroecosystems in Jilin Province based on energy theory. *Chinese Journal of Ecology*, 10, 027.
- Zwickle, S., Wilson, R., & Doohan, D. (2014). Identifying the challenges of promoting ecological weed management (EWM) in organic agroecosystems through the lens of behavioral decision making. *Agriculture and human values*, 31(3), 355-370.