UTN
IBARRA - ECUADOR

HACIA UNA BIOCIBERNÉTICA REGENERATIVA

SISTEMAS SOCIOECOLÓGICOS, DESARROLLO REGENERATIVO Y RESTAURACIÓN DE TERRITORIOS VIVOS

Autores:

Carvajal-Benavides, José Gabriel
Yaguana-Jiménez, Gladys Neri
Paredes Rodríguez, Hugo Orlando
Sono-Toledo, Daniel David



OM EDITORIAL

Hacia una Biocibernética Regenerativa:

Sistemas Socioecológicos, Desarrollo Regenerativo y Restauración de Territorios Vivos.

Autor/es:

Carvajal-Benavides, José Gabriel

Universidad Técnica del Norte

Yaguana-Jiménez, Gladys Neri

Universidad Técnica del Norte

Paredes-Rodríguez, Hugo Orlando

Universidad Técnica del Norte

Sono-Toledo, Daniel David

Universidad Técnica del Norte

Datos de Catalogación Bibliográfica

Carvajal-Benavides, J. G.
Yaguana-Jiménez, G. N.
Paredes-Rodríguez, H. O.
Sono-Toledo, D. D.

Hacia una Biocibernética Regenerativa:
Sistemas Socioecológicos, Desarrollo Regenerativo y Restauración de Territorios Vivos.

Oriente-Manabi Editorial, Ecuador, 2026
ISBN: 978-9907-9567-8-8
Formato: 210 mm X 270 mm 310 págs.



Publicado por Oriente-Manabí Editorial
Ecuador, Manabi, Cod. Post. 130101.
Contacto: +593 959 723 343
Email: info@omeditorial.com
www.books.omeditorial.com

Director General:	*Dr. Guerrero Bermúdez Ángel Enrique*
Editor en Jefe:	*Dr. Guerrero Bermúdez Ángel Enrique*
Editor Académico:	*Lcdo. Oltramonti Roberto, Mg*
Supervisor de Producción:	*Ing. Barragán Monrroy Roberto Johan, Mg.*
Diseño:	*OM Editorial*
Consejo Editorial	*OM Editorial*

© Octubre, 2026
Libro Digital, Primera Edición, 2026
Editado, Diseñado, Diagramado y Publicado por Comité OM Editorial
Manabi, Ecuador, 2026
D.R. © 2026 por Autores y OM Editorial Ecuador.
Cámara Ecuatoriana del Libro con Radicación editorial 182865

Disponible para su descarga gratuita en www.books.omeditorial.com

Los contenidos de este libro pueden ser descargados, reproducidos, difundidos e impresos con fines de estudio, investigación y docencia o para su utilización en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca adecuadamente a los autores como fuente y titulares de los derechos de propiedad intelectual, sin que ello implique en modo alguno que aprueban las opiniones, productos o servicios resultantes. En el caso de contenidos que indiquen expresamente que proceden de terceros, deberán dirigirse a la fuente original indicada para gestionar los permisos.

Título del libro:
Hacia una Biocibernética Regenerativa:
Sistemas Socioecológicos, Desarrollo Regenerativo y Restauración de Territorios Vivos.

© Carvajal-Benavides, José Gabriel; Yaguana-Jiménez, Gladys Neri; Paredes-Rodríguez, Hugo Orlando; Sono-Toledo, Daniel David.

ISBN: 978-9907-9567-8-8

https://doi.org/10.63618/omeditorial/l38

Como citar (APA 7ma Edición):
Carvajal-Benavides, J. G., Yaguana-Jiménez, G. N., Paredes-Rodríguez, H. O., & Sono-Toledo, D. D. (2026). *Hacia una Biocibernética Regenerativa: Sistemas Socioecológicos, Desarrollo Regenerativo y Restauración de Territorios Vivos*. Oriente-Manabí Editorial. https://doi.org/10.63618/omeditorial/l38

Cada uno de los textos de OM Editorial han sido sometido a un proceso de evaluación por pares doble ciego externos (double-blind paper review) con base en la normativa del editorial.

Revisores:

Dr. C. Cesar Alberto Cabrera Verdesoto	Universidad Estatal del Sur de Manabí– Ecuador
Ing. Darwin Salvatierra Pilozo, Mg	Universidad Estatal del Sur de Manabí– Ecuador

Aviso Legal:

La información presentada, así como el contenido, fotografías, gráficos, cuadros, tablas y referencias de este manuscrito es de exclusiva responsabilidad del/los autores/es y no necesariamente reflejan el pensamiento de la OM Editorial.

Derechos de autor ©

Este documento se publica bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

El “copyright” y todos los derechos de propiedad intelectual y/o industrial sobre el contenido de esta edición son propiedad de la OM Editorial y sus Autores. Se prohíbe rigurosamente, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total y/o parcial de esta obra, ni su tratamiento informático de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma de ninguna forma o por cualquier medio, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright, salvo cuando se realice con fines académicos o científicos y estrictamente no comerciales y gratuitos, debiendo citar en todo caso a la editorial. Las opiniones expresadas en los capítulos son responsabilidad de los autores.

Reseña de Autores

Carvajal-Benavides, José Gabriel

Universidad Técnica del Norte

jgcarvajalb@utn.edu.ec

https://orcid.org/0000-0001-9920-4991



Nació en Ibarra-Ecuador, Ingeniero Forestal, Magíster en Bioeconomía, Magíster en Gestión de Proyectos, Magíster en Pedagogía en Formación Técnica y Profesional y, Magíster en Educación y Desarrollo Social. Docente investigador de tiempo completo en la Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales FICAYA. Su trayectoria en las ciencias forestales y la educación superior, integrando experiencia en manejo diversificado de los PFNM y de los recursos forestales maderables de manera sostenible en los territorios de comunidades, pueblos y nacionalidades, combinada acertadamente con la innovación pedagógica. Ha dirigido tesis de grado UTN y postgrado UNESUM, participado en proyectos de investigación, publicado libros y artículos indexados. Resalta la investigación aplicada y la formación de nuevas generaciones de profesionales, además, fomenta el desarrollo regenerativo. El enfoque académico y científico refleja una visión integral que contribuye a fortalecer la educación y la cultura forestal desde la ciencia, la bioética y la sostenibilidad, como pilares de un futuro regenerativo.

Yaguana-Jiménez, Gladys Neri

Universidad Técnica del Norte

gnyaguana@utn.edu.ec

https://orcid.org/0000-0002-5159-1846



Nació en Loja, Ecuador. Es Ingeniera Agrícola por la Universidad Nacional de Loja y Máster en Estudios Socioambientales por la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO), sede Ecuador. Se ha desempeñado como docente de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales de la Universidad Técnica del Norte (Ibarra, Ecuador), donde también ha dirigido tesis de grado en las carreras de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables e Ingeniería Forestal. Como docente e investigadora en el área de Manejo y Conservación de Suelos, su trabajo se enfoca en la recuperación de áreas degradadas, el uso de abonos orgánicos, coberturas orgánicas muertas (mulching) y la eficiencia en el uso del agua de riego.

Paredes-Rodríguez, Hugo Orlando

Universidad Técnica del Norte

hoparedes@utn.edu.ec

https://orcid.org/0000-0002-5880-1607



Originario de Puyo, en la Amazonía ecuatoriana, se graduó como Bachiller Químico Biólogo en el Instituto Técnico Superior San Vicente Ferrer. Su formación superior incluye el título de Ingeniero Forestal por la Universidad Técnica del Norte (UTN), una Maestría en Educación y Desarrollo Social (Universidad Tecnológica Equinoccial), otra en Manejo Forestal Sostenible (UNESUM) y es Doctorante en Ciencias Ambientales. Su trayectoria profesional se inició como técnico forestal en proyectos de la GIZ y la Fundación ALTRÓPICO. Fue Coordinador de Proyectos en la Federación de Centros Awa, luego asumió la Coordinación Zonal 3 del Ministerio del Ambiente (2008-2011) y la Coordinación del Plan Amazónico en ECORAE (2011-2012). Entre 2012 y 2017 fue director Zonal de Producción Forestal en el MAG. Actualmente, es docente de pregrado y posgrado en la UTN, donde también coordina la Maestría en Manejo Forestal Sostenible. Es autor y coautor de varias publicaciones científicas indexadas.

Sono-Toledo, Daniel David

Universidad Técnica del Norte

ddsono@utn.edu.ec

https://orcid.org/0000-0001-9492-3129



Docente titular e investigador ecuatoriano con más de veinticinco años de experiencia en educación superior. Licenciado en Informática, Magíster en Docencia Matemática y PhD en Educación, ha consolidado una trayectoria interdisciplinaria en física aplicada, matemática, interculturalidad, energías renovables, inteligencia artificial y tecnología educativa. Profesor de posgrado en la Universidad de Otavalo, Universidad Estatal Península de Santa Elena y Universidad Técnica del Norte, combina su experticia científica con una profunda vocación pedagógica orientada a la innovación y la sostenibilidad. Es autor de artículos científicos y libros sobre educación, tecnología e investigación aplicada, y director de tesis de maestría y doctorado en universidades nacionales e internacionales, entre ellas la Universidad de Buenos Aires (UFLO) – Argentina. Egresado de la Maestría en Inteligencia Artificial, impulsa proyectos como el Kit STEAM Electrónico, promoviendo el pensamiento crítico, la interculturalidad y el uso ético de la inteligencia artificial en la educación contemporánea.

Índice

Reseña de Autores v

Índice ix

Índice de Tablas xxxiv

Índice de Figuras xxxv

PARTE I: BASES CONCEPTUALES, FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y SOCIOECOLÓGICOS 1

Capítulo 1: De la Sostenibilidad al desarrollo regenerativo: Superando el paradigma del “Menos Daño” 2

1.1. Encabezado científico 3

1.1.1. Resumen / Abstract 3

1.2. Apertura Pedagógica 4

1.2.1. Resultados de Aprendizaje 4

1.2.2. Epígrafe 5

1.3. Introducción y contextualización 5

1.3.1. Planteamiento del Problema 5

1.3.2. Estado del arte 6

1.4. Desarrollo teórico-técnico 6

1.4.1. Crítica al paradigma del “menos daño” 6

1.4.2. El Desarrollo regenerativo: Aumentar la capacidad de vida 7

1.4.3. La tríada territorial (Acoplamiento biosfera-sociosfera-tecnosfera) 7

1.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 8

1.5.1. Análisis de caso real 8

1.5.2. Resultados y discusión 9

1.6. Cierre analítico 9

1.6.1. Conclusiones 9

1.6.2. Perspectivas futuras 9
1.6.3. Transición 10
1.7. Aparato pedagógico 10
1.7.1. Preguntas de metacognición 10
1.7.2. Reto práctico 10
1.8. Referencias bibliográficas 10
Capítulo 2: Genealogía de la biocibernética en sistemas Vivos: Panarquía y resiliencia 12
2.1. Encabezado científico 14
2.1.1. Resumen / Abstract 14
2.2. Apertura pedagógica 14
2.2.1. Epígrafe 14
2.3. Introducción y contextualización 15
2.3.1. Planteamiento del problema 15
2.3.2. Estado del arte 15
2.4. Desarrollo teórico-técnico 16
2.4.1. Cibernética clásica, teoría general de sistemas y autopoiesis 16
2.4.2. Cibernética de segundo orden en la sostenibilidad 16
2.4.3. Panarquía y ciclos adaptativos: Resiliencia, umbrales y transiciones críticas 17
2.5. Aplicación Práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 18
2.5.1. Análisis de caso real 18
2.5.2. Resultados y discusión 18
2.6. Cierre analítico 19
2.6.1. Conclusiones 19
2.6.2. Perspectivas futuras 19
2.6.3. Transición 19
2.7. Aparato pedagógico 19

2.7.1. Preguntas de metacognición 19
2.7.2. Reto práctico 20
2.8. Referencias bibliográficas 20
Capítulo 3: Flujos de materia, energía e información: El metabolismo del paisaje 22
3.1. Encabezado científico 23
3.1.1. Resumen / Abstract 23
3.2. Apertura pedagógica 24
3.2.1. Resultados de aprendizaje 24
3.2.2. Epígrafe 24
3.3. Introducción y contextualización 24
3.3.1. Planteamiento del problema 24
3.3.2. Estado del arte 25
3.4. Desarrollo teórico-técnico 25
3.4.1. Metabolismo socioecológico: Colonización y rutas de regeneración 25
3.4.2. Metabolismo urbano biocibernético: Ciudad y cuenca 26
3.4.3. El arbolado urbano como infraestructura viva 26
3.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 27
3.5.1. Análisis de caso real 27
3.5.2. Resultados y discusión 28
3.6. Cierre analítico 28
3.6.1. Conclusiones 28
3.6.2. Perspectivas futuras 29
3.6.3. Transición 29
3.7. Aparato pedagógico 29
3.7.1. Preguntas de metacognición 29
3.7.2. Reto práctico 29

3.8. Referencias bibliográficas 29

Capítulo 4: Bioeconomía regenerativa, biomímesis y biorrefinerías: Redefiniendo el valor 31

4.1. Encabezado científico 32

4.1.1. Resumen / Abstract 32

4.2. Apertura pedagógica 33

4.2.1. Resultados de aprendizaje 33

4.2.2. Epígrafe 33

4.3. Introducción y contextualización 33

4.3.1. Planteamiento del problema 33

4.3.2. Estado del arte 34

4.4. Desarrollo teórico-técnico 34

4.4.1. Bioeconomía regenerativa vs. economía circular (Modelo de la dona). 34

4.4.2. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y biomímesis: Inspiración evolutiva para la resiliencia territorial. 36

4.4.3. Biorrefinerías forestales y bioemprendimientos biobasados escalables para PFNM. 37

4.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 38

4.5.1. Análisis de caso aplicado (diseño conceptual) 38

4.5.2. Resultados y discusión 39

4.6. Cierre analítico 39

4.6.1. Conclusiones 39

4.6.2. Perspectivas futuras 40

4.6.3. Transición 40

4.7. Aparato pedagógico 40

4.7.1. Preguntas de metacognición 40

4.7.2. Reto práctico 40

4.8. Referencias bibliográficas 40

Capítulo 5: El bucle de restauración biocibernética: Ecología del paisaje y etnopaisajes 43

5.1. Encabezado científico 44

5.1.1. Resumen / Abstract 44

5.2. Apertura pedagógica 45

5.2.1. Resultados de aprendizaje 45

5.2.2. Epígrafe 45

5.3. Introducción y contextualización 45

5.3.1. Planteamiento del problema 45

5.3.2. Estado del arte 46

5.4. Desarrollo teórico-técnico 46

5.4.1. Secuencia operativa de RER. 46

5.4.2. Escala micro: Autecología funcional, regulación estomática y plasticidad geoclimática. 47

5.4.3. Escala meso: Ecología del paisaje, etnopaisajes, métricas espaciales y conectividad. 48

5.4.4. Escala macro: Coordinación y resiliencia de bioma. 49

5.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 50

5.5.1. Análisis de caso aplicado (modelo de aula bosque) 50

5.5.2. Resultados y discusión 50

5.6. Cierre analítico 51

5.6.1. Conclusiones 51

5.6.2. Perspectivas futuras 51

5.6.3. Transición 51

5.7. Aparato pedagógico 51

5.7.1. Preguntas de metacognición 51

5.7.2. Reto práctico 51

5.8. Referencias bibliográficas.....52

Capítulo 6: Tecnologías de monitoreo, gemelos digitales y señales de alerta temprana 54

6.1. Encabezado científico.....55

6.1.1. Resumen / Abstract.....55

6.2. Apertura pedagógica 56

6.2.1. Resultados de aprendizaje.....56

6.2.2. Epígrafe 56

6.3. Introducción y contextualización.....56

6.3.1. Planteamiento del problema.....56

6.3.2. Estado del arte 57

6.4. Desarrollo teórico-técnico.....58

6.4.1. Arquitectura multicapa (Física, datos, cibernética, gobernanza). 58

6.4.2. Gemelos digitales y teledetección continua (NDVI/NDWI). 59

6.4.3. Transiciones críticas y “enlentecimiento crítico” (critical slowing down). ……60

6.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 61

6.5.1. Análisis de caso aplicado (propuesta de monitoreo multiescala) 61

6.5.2. Resultados y discusión.....61

6.6. Cierre analítico.....62

6.6.1. Conclusiones.....62

6.6.2. Perspectivas futuras.....62

6.6.3. Transición 62

6.7. Aparato pedagógico.....62

6.7.1. Preguntas de metacognición.....62

6.7.2. Reto práctico 63

6.8. Referencias bibliográficas.....63

Capítulo 7: Gobernanza, planificación integral y el modelo de sistema viable (VSM) 65
7.1. Encabezado científico 66
7.1.1. Resumen / Abstract 66
7.2. Apertura pedagógica 67
7.2.1. Resultados de aprendizaje 67
7.2.2. Epígrafe 67
7.3. Introducción y contextualización 67
7.3.1. Planteamiento del problema 67
7.3.2. Estado del arte 68
7.4. Desarrollo teórico-técnico 68
7.4.1. Traducción de los cinco subsistemas de Beer a la gobernanza ambiental. 68
7.4.2. Planes de manejo integral: articulación estratégica, táctica y operativa. 69
7.4.3. Gobernanza policéntrica y cogestión adaptativa. 70
7.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 71
7.5.1. Análisis de caso aplicado (auditoría institucional propuesta) 71
7.5.2. Resultados y discusión 71
7.6. Cierre analítico 72
7.6.1. Conclusiones 72
7.6.2. Perspectivas futuras 72
7.6.3. Transición 72
7.7. Aparato pedagógico 72
7.7.1. Preguntas de metacognición 72
7.7.2. Reto práctico 73
7.8. Referencias bibliográficas 73
Capítulo 8: Ecología política y la sabiduría como algoritmo territorial 74

8.1. Encabezado científico 75
8.1.1. Resumen / Abstract 75
8.2. Apertura pedagógica 76
8.2.1. Resultados de aprendizaje 76
8.2.2. Epígrafe 76
8.3. Introducción y contextualización 76
8.3.1. Planteamiento del problema 76
8.3.2. Estado del arte 77
8.4. Desarrollo teórico-técnico 78
8.4.1. Etnopaisajes: Coevolución paisaje físico – tejido social. 78
8.4.2. Memoria biocultural como algoritmo de manejo territorial adaptativo. 79
8.5. Justicia espacial, distribución de beneficios y principios bioéticos. 80
8.6. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 81
8.6.1. Análisis de caso real 81
8.6.2. Resultados y discusión 81
8.7. Cierre analítico 82
8.7.1. Conclusiones 82
8.7.2. Perspectivas futuras 82
8.7.3. Transición 82
8.8. Aparato pedagógico 82
8.8.1. Preguntas de metacognición 82
8.8.2. Reto práctico 82
8.9. Referencias bibliográficas 83
Capítulo 9: Hipótesis falsables y tableros de control para el bosque seco andino 85
9.1. Encabezado científico 86
9.1.1. Resumen / Abstract 86

9.2. Apertura pedagógica 87
9.2.1. Resultados de aprendizaje 87
9.2.2. Epígrafe 87
9.3. Introducción y contextualización 87
9.3.1. Planteamiento del problema 87
9.3.2. Estado del arte 88
9.4. Desarrollo teórico-técnico 88
9.4.1. Definición de hipótesis falsables en el contexto del geoparque 88
9.4.2. Diseño del tablero de control multiescalar integrado (Ecológico, económico, táctico) 89
9.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo 89
9.5.1. Análisis de caso real 89
9.5.2. Resultados y discusión 89
9.6. Cierre analítico 91
9.6.1. Conclusiones 91
9.6.2. Perspectivas futuras 91
9.6.3. Transición (Cierre de la Obra) 91
9.7. Aparato pedagógico 92
9.7.1. Preguntas de metacognición 92
9.7.2. Reto práctico 92
9.8. Referencias bibliográficas 92
PARTE II · 12 ESPECIES FORESTALES PARA LA RESTAURACIÓN BIOCIBERNÉTICA 94
Capítulo 1: *Schinus molle L.:* Dendrología, Propagación, Fitoquímica y Restauración Regenerativa en el Geoparque Imbabura. 95
1.1. Encabezado Científico 96
1.1.1 Resumen / Abstract 96
1.2. Apertura Pedagógica 97

1.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)..... 97
1.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino 97
1.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología..... 97
1.3.1. Ecofisiología y respuesta al estrés 97
1.3.2. Anatomía de la madera y xilema 98
1.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal 98
1.4.1. Biología de semillas y germinación 98
1.4.2. Manejo en vivero forestal e inoculación simbiótica 98
1.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 99
1.5.1. Especie Nodriza y Sucesión Facilitada 99
1.5.2. Hidrología Forestal y Dinámica de Control de Erosión 99
1.5.3. Sistemas Integradores Agroforestales..... 99
1.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 100
1.6.1. Bioemprendimientos biobasados y farmacopea 100
1.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 100
1.7.1. Usos Culturales e Identidad Afroandina 100
1.7.2. Usos Medicinales y Textiles 101
1.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 101
1.8.1. Conclusiones biocibernéticas 101
1.9. Referencias Bibliográficas 102
Capítulo 2: *Tara spinosa* (Molina) *Britton & Rose* (sin. *Caesalpinia spinosa*) (Guarango / Tara)..... 104
2.1. Encabezado Científico..... 105
2.1.1. Resumen / Abstract..... 105
2.2. Apertura Pedagógica..... 106
2.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias) 106
2.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino 106

2.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología 107
2.3.1. Fisiología y fenología de la especie 107
2.3.2. Ecofisiología y Respuesta al Estrés 107
2.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal 107
2.4.1. Inoculación Simbiótica 107
2.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 107
2.5.1. Tipos de silvicultura restaurativa 107
2.5.2. Hidrología forestal y suelos 108
2.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y Bioeconomía Escalable 108
2.6.1. Fitoquímica y bioactivos 108
2.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables 108
2.6.3. Biorrefinerías de segunda generación y economía circular 109
2.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 109
2.7.1. Usos Culturales e Identidad 109
2.7.2. Usos Medicinales y Fitoterapéuticos 109
2.7.3. Usos Alimentarios Funcionales 109
2.7.4. Usos Materiales 110
2.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 110
2.8.1. Conclusiones biocibernéticas 110
2.8.2. Preguntas de metacognición y debate 110
2.8.3. Reto práctico profesional 110
2.9. Referencias Bibliográficas 111
Capítulo 3: *Vachellia macracantha* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) *Seigler & Ebinger*: Dendroclimatología, Germinación, Simbiosis Rizobial y Restauración del Bosque Seco. 112
3.1. Encabezado Científico 113
3.1.1. Resumen / Abstract 113
3.2. Apertura Pedagógica 114

3.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias) 114
3.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino 114
3.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología 114
3.3.1. Ecofisiología y respuesta al estrés 114
3.3.2. Anatomía de la madera y xilema 114
3.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y Reproducción Forestal 115
3.4.1. Biología de semillas y germinación 115
3.4.2. Inoculación simbiótica 116
3.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 116
3.5.1. Hidrología forestal y suelos 116
3.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 116
3.6.1. Bioemprendimientos biobasados escalables 116
3.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 117
3.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 117
3.8.1. Preguntas de metacognición y debate 117
3.8.2. Reto Práctico profesional 117
3.9. Referencias Bibliográficas 118
Capítulo 4: *Tecoma stans* (L.) *Juss. ex Kunth*: Respuesta al Estrés Hídrico, Conservación de Semillas y Fitoquímica en el Geoparque Imbabura. 119
4.1. Encabezado Científico 120
4.1.1. Resumen / Abstract 120
4.2. Apertura Pedagógica 121
4.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias) 121
4.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino 121
4.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología 121
4.3.1. Dendrología y morfología 121
4.3.2. Fisiología y fenología de la especie 122

4.3.3. Ecofisiología y respuesta al estrés 122
4.3.4. Anatomía de la madera y xilema 122
4.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y Reproducción Forestal 123
4.4.1. Biología de semillas y serminación 123
4.4.2. Inoculación simbiótica 123
4.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 124
4.5.1. Tipos de Silvicultura Restaurativa 124
4.6. TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 124
4.6.1. Fitoquímica y bioactivos 124
4.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables 124
4.6.3. Biorrefinerías de segunda generación y farmacología 124
4.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 125
4.7.1. Usos medicinales y fitoterapéuticos 125
4.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 125
4.8.1. Preguntas de metacognición y debate 125
4.8.2. Reto práctico profesional 125
4.9. Referencias Bibliográficas 126
Capítulo 5: *Sapindus saponaria L*.: Propagación, Saponinas y Remediación Experimental en el Geoparque Imbabura. 127
5.1. Encabezado Científico 128
5.1.1. Resumen / Abstract 128
5.2. Apertura Pedagógica 129
5.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias) 129
5.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino 129
5.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología 129
5.3.1. Anatomía de la madera y xilema 129
5.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal 129

5.4.1. Biología de semillas y germinación 129
5.4.2. Manejo en Vivero Forestal 130
5.4.3. Propagación a gámica (Vegetativa) 130
5.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 131
5.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 131
5.6.1. Fitoquímica y bioactivos 131
5.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 131
5.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 132
5.8.1. Preguntas de metacognición y debate 132
5.8.2. Reto Práctico profesional 132
5.9. Referencias Bibliográficas 133
Capítulo 6: *Bursera graveolens* (Kunth) *Triana & Planch*: Estructura Poblacional, Aceites Esenciales y Bioeconomía No Maderable en el Geoparque Imbabura. 134
6.1. Encabezado Científico 135
6.1.1. Resumen / Abstract 135
6.2. Apertura Pedagógica 136
6.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias) 136
6.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino 136
6.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología 136
6.3.1. Ecofisiología y respuesta al estrés 136
6.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal 137
6.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 137
6.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 138
6.6.1. Fitoquímica y bioactivos 138
6.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables 138
6.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y Etnobotánica 138
6.7.1. Usos medicinales y fitoterapéuticos 138

6.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 139
6.8.1. Conclusiones biocibernéticas 139
6.8.2. Preguntas de metacognición y debate 139
6.8.3. Reto práctico profesional 139
6.9. Referencias Bibliográficas 139
Capítulo 7: *Jatropha curcas L.:* Bioenergía, Toxicología de Ésteres de Forbol y Detoxificación de Coproductos en el Geoparque Imbabura. 141
7.1. Encabezado Científico 142
7.1.1. Resumen / Abstract 142
7.2. Apertura Pedagógica 143
7.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias) 143
7.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino 143
7.3. BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología 143
7.3.1. Dendrología y morfología 143
7.3.2. Fisiología y fenología de la especie 144
7.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción rorestal 144
7.4.1. Biología de semillas y germinación 144
7.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 144
7.5.1. Hidrología forestal y suelos 144
7.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 145
7.6.1. Fitoquímica y bioactivos 145
7.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables 145
7.6.3. Biorrefinerías de segunda generación y economía circular 145
7.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 146
7.7.1. Usos Medicinales y fitoterapéuticos 146
7.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 146
7.8.1. Preguntas de metacognición y debate 146

7.8.2. Reto Práctico profesional 146
7.9. Referencias Bibliográficas 147
Capítulo 8: *Calliandra pittieri Standl.:* Taxonomía, Ecología Funcional y Validación Territorial para la Restauración del Geoparque Imbabura. 148
8.1. Encabezado Científico 149
8.1.1. Resumen / Abstract 149
8.2. Apertura Pedagógica 150
8.2.1. Resultados de Aprendizaje (Competencias) 150
8.2.2. Máxima Filosófica / Axioma Andino 150
8.3. LA BIOSFERA: Maquinaria Biológica y Ecofisiología 150
8.3.1. Dendrología y Morfología 150
8.3.2. Ecofisiología y respuesta al estrés 151
8.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal 151
8.4.1. Biología de semillas y germinación 151
8.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 151
8.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 152
8.6.1. Bioemprendimientos biobasados escalables 152
8.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 152
8.7.1. Usos Culturales e identidad 152
8.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 152
8.8.1. Preguntas de metacognición y debate 152
8.8.2. Reto Práctico profesional 153
8.9. Referencias Bibliográficas 153
Capítulo 9: *Inga feuilleei DC.*: Propagación Vegetativa, Agroforestería y Validación Ecológica en el Geoparque Imbabura. 154
9.1. Encabezado Científico 155
9.2. Apertura Pedagógica 156
9.2.1. Resultados de Aprendizaje (Competencias) 156

9.2.2. Máxima Filosófica / Axioma andino 156
9.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología 156
9.3.1. Dendrología y morfología 156
9.3.2. Ecofisiología y respuesta al estrés 157
9.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal 157
9.4.1. Biología de semillas y germinación 157
9.4.2. Propagación agámica (Vegetativa) 157
9.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 158
9.5.1. Hidrología forestal y suelos 158
9.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 158
9.6.1. Fitoquímica y bioactivos 158
9.6.2. Usos Dendroenergéticos y carbono 158
9.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y Etnobotánica 158
9.7.1. Usos Alimentarios funcionales 158
9.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 159
9.8.1. Preguntas de metacognición y debate 159
9.8.2. Reto Práctico profesional 159
9.9. Referencias Bibliográficas 159
Capítulo 10: *Inga insignis Kunth:* Conservación, Micropropagación y Agroforestería Andina en el Geoparque Imbabura. 161
10.1. Encabezado Científico 162
10.2. Apertura Pedagógica 163
10.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias) 163
10.2.2. Máxima Filosófica / Axioma Andino 163
10.3. LA BIOSFERA: Maquinaria Biológica y Ecofisiología 163
10.3.1. Dendrología y morfología 163
10.3.2. Ecofisiología y respuesta al estrés 164

10.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal 164
10.4.1. Biología de Semillas y Germinación 164
10.4.2. Propagación agámica (Vegetativa) 164
10.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 164
10.5.1. Criterios de Plantación Regenerativa 164
10.5.2. Hidrología forestal y suelos 165
10.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y Bioeconomía Escalable 165
10.6.1. Usos dendroenergéticos y carbono 165
10.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 165
10.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 166
10.8.1. Preguntas de metacognición y debate 166
10.8.2. Reto Práctico profesional 166
10.9. Referencias Bibliográficas 166
Capítulo 11: *Spondias purpurea L.*: Propagación Vegetativa, Poscosecha y Economía Botánica de Ambuquí 168
11.1. Encabezado Científico 169
11.2. Apertura Pedagógica 170
11.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias) 170
11.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino 170
11.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología 170
11.3.1. Fisiología y fenología de la especie 170
11.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal 170
11.4.1. Propagación agámica (vegetativa) 170
11.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje 171
11.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable 171
11.6.1. Fitoquímica y bioactivos 171
11.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables 171

11.6.3. Biorrefinerías de segunda generación 172
11.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica 172
11.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 172
11.8.1. Conclusiones Biocibernéticas 172
11.8.2. Preguntas de Metacognición y Debate 173
11.8.3. Reto Práctico Profesional 173
11.9. Referencias Bibliográficas 173
Capítulo 12: *Cynophalla didymobotrys* (Ruiz & Pav. ex DC.) *Cornejo & Iltis*: Taxonomía, Afinidades Climáticas y Agenda de Restauración en el Geoparque Imbabura. 174
12.1. Encabezado Científico 175
12.1.1. Resumen / Abstract 175
12.2. Apertura Pedagógica 176
12.2.1. Resultados de Aprendizaje (Competencias) 176
12.2.2. Máxima Filosófica / axioma andino 176
12.3.LA BIOSFERA: Maquinaria Biológica y Ecofisiología 176
12.3.1. Dendrología y morfología 176
12.3.2. Ecofisiología y Respuesta al Estrés 177
12.3.3. Anatomía de la Madera y Xilema 177
12.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y Reproducción Forestal 177
12.4.1. Biología de Semillas y Germinación 177
12.4.2. Inoculación Simbiótica 177
12.5.LA TECNOSFERA II: Restauración Biocibernética y Paisaje 178
12.5.1. Tipos de Silvicultura Restaurativa 178
12.5.2. Hidrología Forestal y Control Biológico 178
12.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y Bioeconomía Escalable 178
12.7.LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y Etnobotánica 179

12.7.1. La Bomba del Chota 179
12.7.2. Justicia Espacial y Geoturismo 179
12.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 179
12.8.1. Conclusiones Biocibernéticas 179
12.8.2. Preguntas de Metacognición y Debate 180
12.8.3. Reto Práctico Profesional 180
12.9. Referencias Bibliográficas 180
PARTE III APLICACIÓN BIOCIBERNÉTICA IN SITU 181
Alcance De La Parte III 182
Regla de integridad científica 182
Lectura de evidencia 182
Capítulo 1: *Schinus molle L.* (Molle) 183
1.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 184
1.1.1. Puerta de validación comercial 185
1.2. Análisis Estructural del Sistema 185
1.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 186
1.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 187
1.5. Evaluación Financiera y Económica 187
1.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 188
1.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 189
1.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 190
1.9. Referencias Bibliográficas 190
Capítulo 2: *Tara spinosa* (Molina) *Britton & Rose* (Guarango / Tara) 192
2.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 193
2.2. Análisis Estructural del Sistema 194
2.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 195
2.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 195

2.5. Evaluación Financiera y Económica 196
2.6. Modelos Económicos Alternativos Y Enfoque De Derechos 197
2.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 198
2.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 198
2.9. Referencias Bibliográficas 199
Capítulo 3: *Vachellia macracantha* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) *Seigler & Ebinger* (Faique / Espino) 201
3.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 202
3.1.1. Puerta de validación comercial 203
3.2. Análisis Estructural del Sistema 203
3.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 204
3.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 204
3.5. Evaluación Financiera y Económica 205
3.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 206
3.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 207
3.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 207
3.9. Referencias Bibliográficas 208
Capítulo 4: *Tecoma stans* (L.) *Juss. ex Kunth* (Cholán / Floramarillo) 209
4.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 210
4.1.1. Puerta de validación comercial 211
4.2. Análisis Estructural del Sistema 211
4.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 212
4.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 212
4.5. Evaluación Financiera y Económica 213
4.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 214
4.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 215

4.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 215
4.9. Referencias Bibliográficas 216
Capítulo 5: *Sapindus saponaria L.* (Jaboncillo) 218
5.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 219
5.1.1. Puerta de validación comercial 220
5.2. Análisis Estructural del Sistema 220
5.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 221
5.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 222
5.5. Evaluación Financiera y Económica 222
5.5.1. Control financiero para editorial 223
5.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 223
5.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 224
5.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 225
5.9. Referencias Bibliográficas 225
Capítulo 6: *Bursera graveolens* (Kunth) *Triana & Planch* (Palo Santo) 227
6.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 228
6.1.1. Puerta de validación comercial 229
6.2. Análisis Estructural del Sistema 229
6.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 230
6.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 230
6.5. Evaluación Financiera y Económica 231
6.5.1. Control financiero para editorial 232
6.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 232
6.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 233
6.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 233
6.9. Referencias Bibliográficas 234
Capítulo 7: *Jatropha curcas L.* (Piñón) 236

7.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 237
7.1.1.Puerta de validación comercial 238
7.2. Análisis Estructural del Sistema 238
7.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 239
7.4.Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 240
7.5.Evaluación Financiera y Económica 240
7.5.1.Control financiero para editorial 241
7.6.Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 241
7.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 242
7.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 243
7.9. Referencias Bibliográficas 243
Capítulo 8: *Calliandra pittieri Standl.* (Carbonero / Pluma de Yátero) 245
8.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 246
8.1.1.Puerta de validación comercial 247
8.2.Análisis Estructural del Sistema 247
8.3.Matriz de Marco Lógico Biocibernético 248
8.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 248
8.5. Evaluación Financiera y Económica 249
8.5.1.Control financiero para editorial 250
8.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 250
8.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 251
8.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 251
8.9. Referencias Bibliográficas 252
Capítulo 9: *Inga feuilleei DC.* (Pacay / Guaba de Cajón) 253
9.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 254
9.1.1. Puerta de validación comercial 255
9.2. Análisis Estructural del Sistema 255

9.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 256
9.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 257
9.5. Evaluación Financiera y Económica 257
9.5.1. Control financiero para editorial 258
9.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 258
9.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 259
9.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 259
9.9. Referencias Bibliográficas 260
Capítulo 10: *Inga insignis Kunth* (Guaba de Zorro) 262
10.1. IDENTIFICACIÓN DEL BIOEMPRENDIMIENTO Y MERCADO (Visibilidad Comercial) 263
10.1.1. Puerta de validación comercial 264
10.2. Análisis Estructural del Sistema 264
10.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 265
10.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 266
10.5. Evaluación Financiera y Económica 266
10.5.1. Control financiero para editorial 267
10.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 267
10.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 268
10.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 268
10.9. Referencias Bibliográficas 269
Capítulo 11: *Spondias purpurea L.* (Ovo / Jocote) 271
11.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 272
11.1.1. Puerta de validación comercial 273
11.2. Análisis Estructural del Sistema 273
11.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 274
11.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 274

11.5. Evaluación Financiera y Económica 275
11.5.1. Control financiero para editorial 276
11.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 276
11.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 277
11.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 277
11.9. Referencias Bibliográficas 278
Capítulo 12: *Cynophalla didymobotrys* (Ruiz & Pav. ex DC.) *Cornejo & Iltis* (Quebrajacho) 279
12.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado 280
12.1.1 . Puerta de validación comercial 281
12.2. Análisis Estructural del Sistema 281
12.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético 282
12.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería 282
12.5. Evaluación Financiera y Económica 283
12.5.1. Control financiero para editorial 284
12.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos 284
12.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental 285
12.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico 285
12.9. Referencias Bibliográficas 286
Referencias Bibliográficas 287

Índice de Tablas

Tabla 1 Tablero de control biocibernética multiescalar - Corredor Ambuquí-salinas-mira 88
Tabla 2 Hipótesis falsables para el corredor Ambuquí-Salinas-Mira..... 90
Tabla 3 Tabla de síntesis · Evidencia verificable y aplicaciones potenciales . 100
Tabla 4 Los Indicadores Y Metas..... 186
Tabla 5 Efectos esperados y constituyen 190

Índice de Figuras

Figura 1 Sostenibilidad al desarrollo regenerativo 3
Figura 2 Genealogía de la biocibernética en sistemas Vivos 14
Figura 3 Flujos de materia 23
Figura 4 Bioeconomía regenerativa 32
Figura 5 El bucle de restauración biocibernética 44
Figura 6 Tecnologías de monitoreo 55
Figura 7 Planificación integral 66
Figura 8 Ecología 75
Figura 9 Hipótesis falsables 86
Figura 10 Dendrología, propagación, fitoquímica y restauración regenerativa 96
Figura 11 Dendrología, biorrefinerías de taninos y agroforestería regenerativa 105
Figura 12 Vachellia macracantha 113
Figura 13 Anatomía de la madera y xilema 115
Figura 14 Respuesta al estrés hídrico, conservación de semillas y fitoquímica 120
Figura 15 La madera y el sistema vascular de T. stans 123
Figura 16 Sapindus saponaria 128
Figura 17 Biología de semillas y germinación 130
Figura 18 Bursera graveolens 135
Figura 19 Jatropha curcas L. (Piñón) 142
Figura 20 Calliandra pittieri Standl 149
Figura 21 Propagación Vegetativa, Agroforestería y Validación Ecológica en el Geoparque Imbabura. 155
Figura 22 Conservación, micropropagación y agroforestería andina 162
Figura 23 Spondias purpurea L. 169
Figura 24 Taxonomía, afinidades climáticas y restauración con enfoque precautorio 175

HACIA UNA BIOCIBERNÉTICA REGENERATIVA

Sistemas Socioecológicos, Desarrollo Regenerativo y Restauración de Territorios Vivos

PARTE I: BASES CONCEPTUALES, FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y SOCIOECOLÓGICOS



Capítulo 1: De la Sostenibilidad al desarrollo regenerativo: Superando el paradigma del “Menos Daño”

De la Sostenibilidad al desarrollo regenerativo: Superando el paradigma del “Menos Daño”

Figura 1.

Sostenibilidad al desarrollo regenerativo



1.1. Encabezado científico

1.1.1. Resumen / Abstract

El paradigma de la sostenibilidad convencional, edificado sobre la lógica de “minimizar el daño”, ha demostrado ser insuficiente frente a la degradación acelerada de los sistemas socioecológicos andinos. Este capítulo argumenta, con apoyo en la literatura sobre diseño regenerativo (Reed, 2007) y sobre la gobernanza de sistemas socioecológicos complejos (Ostrom, 2009), que el Desarrollo Regenerativo constituye un salto epistemológico: no aspira a ralentizar el declive de un territorio, sino a incrementar activamente su capacidad de vida y de autoorganización. Se introduce la Tríada Territorial -Biosfera, Sociosfera y Tecnosfera- como modelo mínimo de acoplamiento sistémico para

la gestión del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura, reconocido internacionalmente desde 2019 (UNESCO, 2019). Como contraste empírico, se examinan programas de forestación para secuestro de carbono en el páramo ecuatoriano: las plantaciones de pino pueden incrementar el carbono arbóreo, pero en varios sitios presentan menores existencias de carbono orgánico del suelo que coberturas de páramo natural o pastoreado (Quiroz Dahik et al., 2021); a la vez, una evaluación de PROFAFOR encontró adicionalidad ambiental y fugas relativamente bajas, aunque los ingresos adicionales no equivalían automáticamente a alivio de la pobreza (Wunder & Albán, 2008). Esta evidencia obliga a valorar la regeneración con indicadores ecológicos, sociales y de gobernanza, no con una sola métrica de carbono. El capítulo cierra sentando las bases conceptuales que el Capítulo 2 desarrollará como "maquinaria" biocibernética de la regeneración.

Palabras Clave / Keywords

Desarrollo Regenerativo; Sostenibilidad; Tríada Territorial; Sistemas Socioecológicos; Geoparque Imbabura.

1.2. Apertura Pedagógica

1.2.1. Resultados de Aprendizaje

1. Diferenciar conceptual y operativamente la sostenibilidad convencional del Desarrollo Regenerativo, identificando sus supuestos epistemológicos divergentes.
2. Modelar las interacciones fundamentales de la Tríada Territorial (Biosfera-Sociosfera-Tecnosfera) en un ecosistema andino concreto.
3. Argumentar, con evidencia documentada, por qué las intervenciones de "menos daño" pueden perpetuar -en lugar de revertir- la pérdida de resiliencia territorial.

1.2.2. Epígrafe

“Amor fati” - Abraza el destino y el estado actual del territorio, no para resignarte a su degradación, sino como el punto de partida ineludible para su transformación regenerativa.

1.3. Introducción y contextualización

1.3.1. Planteamiento del Problema

El bosque seco andino no es un ecosistema marginal: es, junto con sus equivalentes neotropicales, uno de los biomas forestales más amenazados del planeta. En el corredor que va de Ecuador a Perú y Venezuela, el bosque seco remanente representa menos del 6 % de su extensión potencial original, muy por debajo del promedio regional americano (Portillo-Quintero y Sánchez-Azofeifa, 2010). Esta cifra no describe una amenaza futura, sino un déficit ya consumado de superficie, conectividad y capacidad regenerativa. Frente a este escenario, el modelo de conservación dominante -diseñado bajo el paradigma de la sostenibilidad- ha priorizado estabilizar el declive: restringir el uso, mitigar la tala, compensar emisiones. Sin embargo, estabilizar un sistema que ya perdió la mayor parte de su base biofísica no equivale a restaurar su capacidad de autoorganización. El propio territorio de estudio de esta obra, el Geoparque Mundial UNESCO Imbabura -declarado como tal en abril de 2019, el primero de su categoría en Ecuador (UNESCO, 2019)-, condensa esta tensión: un mosaico de valles secos, páramos y paisajes agrícolas gestionado bajo lógicas sectoriales que rara vez dialogan entre sí. El problema, en consecuencia, no es solo ecológico: es el desacoplamiento estructural entre la biosfera que se degrada, la sociosfera que la habita y la tecnosfera que interviene sobre ella sin comprenderla como un sistema único. "Tratar el cambio climático como un problema aislado ya no resulta metodológica ni políticamente suficiente. La acción climática y el desarrollo sostenible son procesos interdependientes, y el desarrollo resiliente al clima integra adaptación y mitigación para avanzar hacia mejores condiciones de vida. El problema climático se expresa de manera distinta según el territorio, pero en todos los casos opera como un factor que reorganiza riesgos, capacidades y oportunidades de desarrollo. En planificación territorial, el territorio debe asumirse como la unidad de análisis donde coinciden

población, infraestructura, actividades productivas, servicios, ecosistemas y decisiones públicas." (Carvajal-Benavides et al., 2026).

1.3.2. Estado del arte

La crítica al paradigma de la sostenibilidad como “ejercicio de eficiencia” fue formulada de manera influyente por Reed (2007), quien sostuvo que reducir el daño ambiental -por eficiente que sea la técnica empleada- no genera por sí mismo sistemas vivos más saludables, y propuso una jerarquía de enfoques de diseño que culmina en la regeneración de los sistemas socioecológicos, no solo en su preservación. En paralelo, Ostrom (2009) ofreció un marco general para analizar la sostenibilidad de sistemas socioecológicos complejos, identificando subsistemas interdependientes -recursos, usuarios, sistemas de gobernanza y ecosistemas relacionados- cuya desarticulación explica buena parte de los fracasos en la gestión de recursos comunes. Ambas fronteras teóricas -el giro regenerativo en el diseño y el análisis estructurado de sistemas socioecológicos- convergen en un punto: ningún territorio se regenera gestionando de forma aislada su componente biofísico. Esta convergencia es la que la Tríada Territorial busca operacionalizar para el caso del Geoparque Imbabura.

1.4. Desarrollo teórico-técnico

1.4.1. Crítica al paradigma del “menos daño”

La sostenibilidad convencional, tal como se practica en la gestión territorial y en el diseño del entorno construido, opera predominantemente como un ejercicio de eficiencia: hacer lo mismo, pero con menor huella (Reed, 2007). Bajo esta lógica, los sistemas de certificación, las líneas base de “no pérdida neta” y los indicadores de mitigación comparten un mismo supuesto implícito: que el estado deseable del territorio es la ausencia de deterioro adicional, no el incremento de su vitalidad. El problema de este supuesto es doble. Primero, asume que el sistema de referencia -el ecosistema antes de la intervención humana- seguiría siendo viable si simplemente se detuviera el daño, cuando en realidad muchos sistemas ya cruzaron umbrales que impiden su recuperación espontánea. Segundo, trata a la biosfera, la sociosfera y la tecnosfera como compartimentos separados que se optimizan de manera independiente, en lugar de reconocerlos

como un único sistema acoplado. El resultado observable en el bosque seco andino es consistente con ambos límites: reducir la tasa de deforestación no revierte la fragmentación ya instalada, y las políticas de "compensación" forestal -como se documentará en el apartado 5 de este capítulo- pueden incluso profundizar el desacoplamiento entre biosfera y sociosfera.

1.4.2. El Desarrollo regenerativo: Aumentar la capacidad de vida

Frente a esa insuficiencia, el Desarrollo Regenerativo desplaza la pregunta de gestión de "¿cuánto daño podemos evitar?" a "¿cuánta capacidad de vida y de autoorganización podemos restituir?" (Reed, 2007). Este cambio no es meramente retórico: implica que el diseñador, el técnico forestal o el gestor territorial deje de ser un agente externo que "aplica" soluciones sobre un objeto pasivo, y pase a ser un participante que actúa dentro de un sistema vivo cuya salud -incluida la salud humana- depende de la calidad de esa participación. Trasladado al bosque seco andino, esto significa que el criterio de éxito de una intervención no es únicamente la superficie reforestada o la tasa de deforestación evitada, sino el aumento medible de la resiliencia sistémica: mayor diversidad funcional, mayor conectividad del paisaje, mayor capacidad de las comunidades locales para autogestionar el territorio. El Desarrollo Regenerativo no descarta las métricas de la sostenibilidad; las subordina a un objetivo más exigente.

1.4.3. La tríada territorial (Acoplamiento biosfera-sociosfera-tecnosfera)

La Tríada Territorial formaliza ese acoplamiento en tres esferas interdependientes. La Biosfera comprende los componentes vivos e inertes del ecosistema -cobertura vegetal, suelos, ciclo hídrico, biodiversidad- y su dinámica propia de perturbación y sucesión. La Sociosfera incluye a los actores humanos, sus instituciones, saberes y reglas de uso del territorio; su tratamiento como subsistema autónomo, y no como mero "usuario" externo, recoge el argumento de Ostrom (2009) según el cual la probabilidad de una gestión sostenible depende críticamente de las variables de gobernanza y de los propios usuarios

del recurso, y no solo de las características biofísicas del ecosistema. La Tecnosfera, finalmente, agrupa las infraestructuras, tecnologías de monitoreo y sistemas de decisión que median la relación entre las otras dos esferas -desde una acequia comunitaria hasta un sensor satelital-. La Tríada no es una lista de tres categorías: es un modelo de bucles de retroalimentación entre ellas, en el sentido que Meadows (2008) atribuye a todo sistema complejo, donde el comportamiento observable del territorio emerge de la estructura de esas interconexiones y no de la suma de sus partes.

Foco tecnológico

La modelación de las interacciones territoriales exige abandonar los esquemas lineales de causa-efecto (“se tala, luego se erosiona, luego se reforesta”) y adoptar diagramas de bucles causales, la herramienta que Meadows (2008) propone para representar los ciclos de retroalimentación -de balance y de refuerzo- que gobiernan el comportamiento de un sistema en el tiempo. Este lenguaje visual es la base metodológica sobre la que se construirá la biocibernética territorial desarrollada en el Capítulo 2.

1.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

1.5.1. Análisis de caso real

El programa PROFAFOR constituye un caso especialmente útil para examinar la diferencia entre una meta sectorial -secuestro de carbono- y una evaluación regenerativa multidimensional. De acuerdo con Quiroz Dahik et al. (2021), PROFAFOR suscribió 152 contratos de forestación y, hasta 2003, había promovido aproximadamente 22 000 ha de plantaciones en las tierras altas andinas, cerca del 94 % con pino. En un gradiente altitudinal del sur de Ecuador, esos autores observaron que las plantaciones de Pinus patula incorporaban un nuevo reservorio de carbono en la biomasa arbórea, pero que el carbono orgánico del suelo era significativamente menor que en coberturas de páramo natural o pastoreado en la mayoría de los sitios comparados. La dimensión social y económica también requiere matices: Wunder y Albán (2008), al evaluar PROFAFOR como esquema de pagos por servicios ambientales, encontraron alta adicionalidad probable y fugas relativamente bajas, junto con beneficios de

ingreso que no bastaban, por sí solos, para caracterizar el programa como instrumento de reducción de la pobreza. El caso no demuestra que toda plantación exótica fracase; demuestra que una métrica favorable en una dimensión puede coexistir con costos, límites o resultados distintos en otras.

1.5.2. Resultados y discusión

La lectura conjunta de ambas evaluaciones impide dos simplificaciones: no es científicamente correcto concluir que toda forestación con especies exóticas constituye un fracaso, pero tampoco es válido inferir un resultado regenerativo a partir del carbono arbóreo o de la adicionalidad de un mecanismo financiero. El balance cambia según el reservorio de carbono considerado, los efectos sobre suelo y otros servicios ecosistémicos, la distribución de beneficios y la capacidad de las comunidades para decidir y aprender durante la intervención (Quiroz Dahik et al., 2021; Wunder & Albán, 2008). Para el Geoparque Imbabura, la lección es metodológica: la Biosfera, la Sociosfera y la Tecnosfera deben evaluarse simultáneamente mediante indicadores explícitos y verificables.

1.6. Cierre analítico

1.6.1. Conclusiones

La sostenibilidad, entendida como minimización del daño, puede resultar insuficiente cuando un sistema ya ha perdido parte de su capacidad regenerativa; el Desarrollo Regenerativo propone evaluar si una intervención incrementa vitalidad, autoorganización y capacidad adaptativa. La evidencia revisada para plantaciones de pino y esquemas de secuestro de carbono en Ecuador muestra que el desempeño depende de múltiples dimensiones -carbono arbóreo y edáfico, servicios ecosistémicos, beneficios locales y gobernanza- y que ninguna de ellas, considerada aisladamente, permite certificar un resultado regenerativo (Quiroz Dahik et al., 2021; Wunder & Albán, 2008).

1.6.2. Perspectivas futuras

La integración de métricas regenerativas -capacidad de autoorganización, conectividad funcional, robustez institucional- en los instrumentos de planificación territorial del Geoparque Imbabura debería dejar de ser una

aspiración discursiva y convertirse, hacia el horizonte de 2050, en un requisito vinculante de todo proyecto de restauración forestal y de bioeconomía en la región.

1.6.3. Transición

Habiendo establecido la necesidad del Desarrollo Regenerativo y el modelo de acoplamiento que propone la Tríada Territorial, el siguiente capítulo desentraña la "maquinaria" que hace posible esa regeneración: la genealogía de la biocibernética en los sistemas vivos, desde la cibernética clásica hasta la panarquía y los ciclos adaptativos de resiliencia.

1.7. Aparato pedagógico

1.7.1. Preguntas de metacognición

1. ¿En qué momento un proyecto de economía circular o de compensación de carbono puede resultar perjudicial si carece de un enfoque regenerativo que incorpore a la sociosfera?
2. A partir del caso PROFAFOR, ¿qué indicadores adicionales al carbono deberían incorporarse para evaluar simultáneamente Biosfera, Sociosfera y Tecnosfera sin confundir éxito sectorial con éxito regenerativo?

1.7.2. Reto práctico

Mapee un problema ambiental de su cantón dividiendo sus causas y sus posibles soluciones en las tres esferas de la Tríada Territorial (Biosfera, Sociosfera, Tecnosfera), identificando al menos una interacción de retroalimentación entre dos de ellas.

1.8. Referencias bibliográficas

Carvajal-Benavides, J. G., Palacios-López, L. A., Paredes-Morán, J. G., Loaiza-Vélez, H. F., Salazar-Cobeña, G. V., Capia-López, J. A. R., Gómez-Matos, H. J., Reategui-Noriega, E. E., Chang-Gómez, M. A., & Marquez-López, M. C. (2026). *Cambio Climático y Desarrollo Sostenible: Adaptación, Mitigación y Resiliencia Territorial*. Oriente-Manabí Editorial. https://doi.org/10.63618/omeditorial/113.

Meadows, D. H. (2008). *Thinking in systems: A primer.* Chelsea Green Publishing.

Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 325(5939), 419–422. https://doi.org/10.1126/science.1172133

Portillo-Quintero, C. A., y Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the *Americas. Biological Conservation,* 143(1), 144–155. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.020

Quiroz Dahik, C., Crespo, P., Stimm, B., Mosandl, R., Cueva, J., Hildebrandt, P., & Weber, M. (2021). Impacts of pine plantations on carbon stocks of páramo sites in southern Ecuador. *Carbon Balance and Management*, 16, Article 5. https://doi.org/10.1186/s13021-021-00168-5

Reed, B. (2007). Shifting from 'sustainability' to regeneration. Building Research & Information, 35(6), 674–680. https://doi.org/10.1080/09613210701475753

UNESCO. (2019). *Imbabura UNESCO Global Geopark*. Programa Internacional de Geociencias y Geoparques (IGGP). https://www.unesco.org/en/iggp/imbabura-unesco-global-geopark

Wunder, S., & Albán, M. (2008). Decentralized payments for environmental services: The cases of Pimampiro and PROFAFOR in Ecuador. *Ecological Economics,* 65(4), 685–698. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.11.004

Capítulo 2: Genealogía de la biocibernética en sistemas Vivos: Panarquía y resiliencia

Genealogía de la biocibernética en sistemas Vivos: Panarquía y resiliencia

Figura 2.

Genealogía de la biocibernética en sistemas Vivos



2.1. Encabezado científico

2.1.1. Resumen / Abstract

Este capítulo fundamenta la biocibernética como núcleo operativo del Desarrollo Regenerativo presentado en el Capítulo 1. Se traza su genealogía desde la cibernética clásica de Wiener (1948), pasando por la Teoría General de Sistemas de von Bertalanffy (1968), la autopoiesis de Maturana y Varela (1980) y la cibernética de segundo orden de von Foerster (1979), hasta llegar a la teoría de la Panarquía de Gunderson y Holling (2002), que describe cómo los sistemas socioecológicos operan mediante ciclos adaptativos anidados en múltiples escalas. Se explican los mecanismos de resiliencia ecológica (Holling, 1973), los umbrales y las señales de alerta temprana de transiciones críticas (Scheffer et al., 2009), y se introduce la memoria ecológica (Johnstone et al., 2016) como el mecanismo por el cual los ecosistemas forestales andinos -incluidos los relictos de bosque seco de Imbabura afectados por incendios- conservan la capacidad de reorganizarse tras una perturbación.

Palabras clave / Keywords

Biocibernética; Autopoiesis; Panarquía; Resiliencia; Ciclos Adaptativos.

2.2. Apertura pedagógica

Resultados de aprendizaje

1. Explicar el funcionamiento de un ecosistema mediante bucles de retroalimentación (positivos y negativos).
2. Identificar las fases del ciclo adaptativo en un bosque seco sometido a perturbaciones.
3. Distinguir la resiliencia ecológica de la estabilidad de ingeniería al analizar la capacidad de recuperación de un sistema socioecológico andino.

2.2.1. Epígrafe

“Temet nosce” (Conócete a ti mismo) - Aplicado al territorio: un sistema socioecológico solo puede regenerarse cuando comprende sus propios límites, umbrales y memorias adaptativas.

2.3. Introducción y contextualización

2.3.1. Planteamiento del problema

La silvicultura tradicional hereda con frecuencia el supuesto de estabilidad de la ingeniería clásica: la idea de que un ecosistema saludable es aquel que retorna rápidamente a un único punto de equilibrio tras una perturbación. Holling (1973) mostró que ese supuesto describe mal a numerosos sistemas ecológicos, cuya persistencia depende de absorber perturbaciones sin cruzar hacia otro régimen. En Imbabura, el manejo del fuego constituye un problema verificable de perturbación y capacidad institucional: Carvajal-Benavides et al. (2025) reportaron que los incendios en Angochagua afectaron 4 480 ha de vegetación y, en una encuesta a 296 personas, identificaron brechas de preparación comunitaria, entre ellas ausencia de equipo de protección individual en el 75 % y falta de capacitación en el 66 % de los participantes. Estos datos no demuestran por sí solos un régimen de resiliencia específico ni una “paradoja de la supresión”; sí justifican analizar conjuntamente perturbación, vulnerabilidad, aprendizaje y capacidad de respuesta. La incertidumbre climática refuerza la necesidad de un lenguaje de umbrales, memoria y adaptación.

2.3.2. Estado del arte

La cibernética de segundo orden, formulada por von Foerster (1979) como “cibernética de la cibernética”, desplazó el foco de los sistemas observados hacia el observador que participa en ellos, un giro epistemológico directamente aplicable a la gestión territorial: el técnico forestal no observa el bosque desde afuera, sino que es parte del sistema que pretende regular. En paralelo, la teoría de la Panarquía (Gunderson y Holling, 2002) ofrece el marco más desarrollado para modelar cómo los sistemas socioecológicos atraviesan ciclos adaptativos de crecimiento, conservación, liberación y reorganización, anidados en escalas que van del rodal forestal a la cuenca hidrográfica. Ambas fronteras convergen en un punto crítico para este libro: la gestión regenerativa del bosque seco andino requiere modelar explícitamente en qué fase del ciclo adaptativo se encuentra el sistema, en lugar de suponer que existe un único estado “sano” al que siempre se debe retornar.

2.4. Desarrollo teórico-técnico

2.4.1. Cibernética clásica, teoría general de sistemas y autopoiesis

La cibernética nace formalmente con Wiener (1948), quien la definió como el estudio del control y la comunicación en el animal y en la máquina, centrando su atención en los bucles de retroalimentación mediante los cuales un sistema ajusta su comportamiento futuro a partir de información sobre su propio desempeño pasado. Casi en simultáneo, von Bertalanffy (1968) propuso la Teoría General de Sistemas como un marco para identificar principios organizativos comunes a sistemas biológicos, sociales y técnicos, insistiendo en que un sistema abierto -como un bosque- solo puede comprenderse por sus interacciones con el entorno, no por la suma aislada de sus partes. Décadas más tarde, Maturana y Varela (1980) llevaron esta idea a su expresión más radical con el concepto de autopoiesis: un sistema vivo no es una estructura que simplemente procesa entradas y salidas, sino una red de procesos que continuamente produce y regenera los mismos componentes que la constituyen como unidad autónoma. Aplicado al territorio, esto implica que un bosque no debe modelarse como un inventario estático de árboles, sino como un proceso continuo de autoproducción.

2.4.2. Cibernética de segundo orden en la sostenibilidad

Si la cibernética clásica estudia sistemas regulados desde afuera, la cibernética de segundo orden formulada por von Foerster (1979) reconoce que quien observa y gestiona un sistema forma parte de él, y que sus propias intervenciones alteran el sistema observado. Esta distinción no es un matiz filosófico menor para la gestión ambiental: implica que un plan de manejo forestal diseñado “desde afuera”, sin mecanismos de retroalimentación que incorporen el efecto de la propia intervención institucional, reproduce el mismo error epistemológico que llevó al colapso de proyectos de reforestación lineales. La gobernanza regenerativa -tema que se desarrollará con el Modelo de Sistema Viable en el Capítulo 7- exige un aparato de gestión que se observe y corrija a sí mismo, no solo al ecosistema.

2.4.3. Panarquía y ciclos adaptativos: Resiliencia, umbrales y transiciones críticas

La resiliencia ecológica, definida por Holling (1973) como la magnitud de perturbación que un sistema puede absorber antes de cambiar de estructura y de dominio de atracción, es distinta -y con frecuencia opuesta- a la estabilidad de ingeniería, que valora la rapidez del retorno a un único equilibrio. Gunderson y Holling (2002) formalizaron esta dinámica en el modelo del ciclo adaptativo, que describe cuatro fases: explotación (crecimiento rápido y colonización de recursos disponibles), conservación (acumulación de biomasa y de conexiones internas, con creciente rigidez), liberación (colapso abrupto de esas conexiones ante una perturbación, como un incendio) y reorganización (reordenamiento de los recursos liberados hacia una nueva fase de explotación). Cada uno de estos ciclos, adicionalmente, está anidado dentro de ciclos de mayor escala espacial y temporal -el rodal dentro del paisaje, el paisaje dentro de la cuenca-, lo que da nombre a la Panarquía. Un aporte complementario y crítico para la gestión en tiempo real es el de Scheffer et al. (2009), quienes identificaron el "enlentecimiento crítico" (critical slowing down) como una señal de alerta temprana genérica: a medida que un sistema se aproxima a un umbral de transición crítica, su tasa de recuperación ante pequeñas perturbaciones se hace progresivamente más lenta, un patrón detectable estadísticamente antes de que ocurra el colapso visible.

Insight teórico

Un bosque no es una colección de árboles: es una "autopoiesis" territorial, un sistema que continuamente se produce a sí mismo a través de redes simbióticas de suelo, raíces, hongos micorrízicos y fauna dispersora (Maturana y Varela, 1980). Gestionarlo desde la cibernética de segundo orden exige aceptar que toda intervención humana -incluida la supresión del fuego- pasa a formar parte de esa red autopoiética, y no permanece externa a ella.

2.5. Aplicación Práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

2.5.1. Análisis de caso real

Un caso local publicado permite aplicar el ciclo adaptativo sin presentar la analogía como una constatación experimental del modelo. Carvajal-Benavides et al. (2025) documentaron en Angochagua, Imbabura, 4 480 ha de vegetación afectadas por incendios "Los incendios forestales en ecosistemas andinos representan una amenaza crítica para la biodiversidad, los medios de vida y la seguridad humana. La validación de modelos de planificación participativa para el manejo integral del fuego demuestra que la ausencia de instrumentos locales adaptados agrava la vulnerabilidad socioambiental. La resiliencia comunitaria frente a estas perturbaciones exige políticas públicas basadas en evidencia que integren conocimiento científico, cooperación interinstitucional y saberes ancestrales locales." (Carvajal-Benavides et al., 2025). y encuestaron a 296 personas; el 75 % indicó no disponer de equipo de protección individual, el 66 % carecer de capacitación y el 79 % demandar formación. El estudio co-diseñó y validó un modelo participativo de planificación del fuego con zonificación de riesgos y protocolos escalables. En términos de panarquía, estos resultados pueden interpretarse como evidencia de que la reorganización posterior a la perturbación depende no solo de legados ecológicos, sino también de la capacidad social e institucional para aprender y responder. Esta interpretación es una aplicación analítica del marco de Gunderson y Holling (2002), no una prueba causal de que Angochagua siga exactamente las cuatro fases del ciclo adaptativo.

2.5.2. Resultados y discusión

La fase de reorganización que sigue a una perturbación es donde la memoria ecológica del sistema se vuelve especialmente relevante. Johnstone et al. (2016) muestran que esa memoria se sostiene en legados materiales y biológicos capaces de condicionar la recuperación. En el ámbito cultural, Díaz et al. (2023) documentaron entre el pueblo Kichwa Saraguro del sur de Ecuador el uso tradicional del fuego en páramo y la transmisión intergeneracional de conocimientos vinculados a su manejo, aportando evidencia de que las reglas culturales de quema forman parte del contexto de gestión del disturbio. Para

Angochagua, Carvajal-Benavides et al. (2025) registraron brechas concretas de preparación -75 % sin EPI y 66 % sin capacitación- junto con una demanda de capacitación del 79 %. En conjunto, estas fuentes justifican tratar el conocimiento situado, la formación y los protocolos comunitarios como componentes de la capacidad adaptativa, sin convertirlos en sustitutos de la evidencia biofísica sobre severidad, regeneración o cambios de régimen.

2.6. Cierre analítico

2.6.1. Conclusiones

La gestión forestal biocibernética debe abandonar el objetivo de control determinista -evitar toda perturbación- y orientarse a facilitar la autoorganización sistémica: reconocer en qué fase del ciclo adaptativo se encuentra el territorio y actuar en consecuencia, en lugar de imponer una única fase de conservación permanente que erosiona la resiliencia de largo plazo.

2.6.2. Perspectivas futuras

La incorporación de modelos matemáticos de detección de transiciones críticas -indicadores de enlentecimiento crítico calculados a partir de series temporales de teledetección- a la planificación del manejo del fuego en el Geoparque Imbabura permitiría anticipar colapsos antes de que ocurran, en lugar de solo contabilizarlos después.

2.6.3. Transición

Entendida la cibernética subyacente a los ciclos de vida, muerte y reorganización del bosque, es imperativo analizar cómo fluyen la materia y la energía dentro de este sistema una vez reorganizado, entrando al dominio del metabolismo territorial que desarrolla el siguiente capítulo.

2.7. Aparato pedagógico

2.7.1. Preguntas de metacognición

1. ¿Por qué tratar de mantener un ecosistema forestal permanentemente en su fase de “conservación” (clímax) puede hacerlo más vulnerable a colapsos catastróficos?

2. Si el 75 % de los participantes reporta no disponer de EPI y el 66 % carece de capacitación, ¿qué señales de retroalimentación debería incorporar un sistema adaptativo de manejo del fuego para convertir esas brechas en decisiones de prevención, formación y respuesta?

2.7.2. Reto práctico

Dibuje el diagrama del ciclo adaptativo (explotación, conservación, liberación, reorganización) y posicione en él el estado actual de un ecosistema degradado cercano, justificando su decisión con al menos un indicador observable de resiliencia o de umbral.

2.8. Referencias bibliográficas

Carvajal-Benavides, J. G., Garrido-Aguilar, L. F., Bastidas-Plaza, E. M., Gualoto-Mafla, G. G., Varela-Jácome, G. D., & Rosero-Erazo, R. W. (2025). Gestión regenerativa del fuego en los Andes ecuatorianos: Diagnóstico y validación de un modelo de planificación participativa. *Innova Science Journal,* 3(4), 67–86. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n4/122

Díaz, S. C., Correa Quezada, L., Jiménez Álvarez, L., Loján-Córdova, J., & Carrión-Paladines, V. (2023). Indigenous use of fire in the paramo ecosystem of southern Ecuador: A case study using remote sensing methods and ancestral knowledge of the Kichwa Saraguro people*. Fire Ecology,* 19, Article 5. https://doi.org/10.1186/s42408-022-00164-1

Gunderson, L. H., y Holling, C. S. (Eds.). (2002). Panarchy: *Understanding transformations in human and natural systems. Island Press.*

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. Annual Review *of Ecology and Systematics,* 4, 1–23. https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Johnstone, J. F., Allen, C. D., Franklin, J. F., Frelich, L. E., Harvey, B. J., Higuera, P. E., Mack, M. C., Meentemeyer, R. K., Metz, M. R., Perry, G. L. W., Schoennagel, T., y Turner, M. G. (2016). Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment,* 14(7), 369–378. https://doi.org/10.1002/fee.1311

Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1980). *Autopoiesis and cognition: The realization of the living.* D. Reidel Publishing Company. https://doi.org/10.1007/978-94-009-8947-4

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E. H., Rietkerk, M., y Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature,* 461, 53–59. https://doi.org/10.1038/nature08227

von Bertalanffy, L. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications.* George Braziller.

von Foerster, H. (1979). Cybernetics of cybernetics. En K. Krippendorff (Ed.), *Communication and control in society* (pp. 5–8). Gordon and Breach.

Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine.* MIT Press / John Wiley & Sons

Capítulo 3: Flujos de materia, energía e información: El metabolismo del paisaje

Flujos de materia, energía e información: El metabolismo del paisaje

Figura 3.

Flujos de materia



3.1. Encabezado científico

3.1.1. Resumen / Abstract

Este capítulo traslada el marco biocibernético desarrollado en los capítulos previos al análisis del metabolismo socioecológico, entendiendo al territorio -y en particular a la ciudad- como un procesador de flujos de materia, energía e información. Se retoma el concepto de “colonización de la naturaleza” (Fischer-Kowalski y Haberl, 1998) para caracterizar cómo las sociedades transforman los ecosistemas para incrementar los beneficios que obtienen de ellos, y se traslada este concepto al metabolismo urbano biocibernético (Kennedy et al., 2007), que describe la ciudad como un sistema que intercambia flujos con su cuenca hidrográfica. El capítulo posiciona al arbolado urbano no como ornamento paisajístico, sino como infraestructura viva y nodo crítico de regulación microclimática e hídrica (Nowak y Crane, 2002), y cierra con un estudio de caso sobre el metabolismo urbano de Ibarra, capital del Geoparque Imbabura, que

integra evidencia propia del autor sobre el estado del arbolado y la isla de calor urbana de la ciudad.

Palabras Clave / Keywords

Metabolismo Socioecológico; Metabolismo Urbano; Infraestructura Viva; Arbolado Urbano; Flujos de Energía.

3.2. Apertura pedagógica

3.2.1. Resultados de aprendizaje

1. Cuantificar conceptualmente las entradas y salidas del metabolismo de un ecosistema urbano-forestal.
2. Diseñar estrategias de infraestructura viva basadas en la regulación microclimática.
3. Evaluar críticamente en qué medida la selección de especies del arbolado urbano genera servicios o disservicios ecosistémicos.

3.2.2. Epígrafe

“Carpe diem” - Aprovecha el día, pero en la gestión metabólica: aprovecha la energía solar y los flujos actuales; un sistema regenerativo captura la energía del presente sin hipotecar los flujos del futuro.

3.3. Introducción y contextualización

3.3.1. Planteamiento del problema

Las ciudades y los paisajes agrícolas contemporáneos operan, en su gran mayoría, como sistemas metabólicos lineales: importan agua, energía y alimentos desde cuencas y territorios distantes, y exportan calor residual, aguas servidas y residuos sólidos sin reincorporarlos al ciclo del que provinieron. Kennedy et al. (2007) identificaron, a partir de la comparación de ocho regiones metropolitanas en cinco continentes, un conjunto de procesos metabólicos que amenazan específicamente la sostenibilidad urbana: el descenso de los niveles freáticos, el agotamiento de materiales locales, la acumulación de sustancias tóxicas, la irregular acumulación de nutrientes y, de manera destacada, la formación de islas de calor estivales. Ninguno de estos procesos es exclusivo de

las grandes metrópolis: se manifiesta también en ciudades intermedias de valles andinos como Ibarra, donde la expansión urbana sobre suelos antes agrícolas y forestales altera simultáneamente el balance hídrico y térmico de la cuenca. El resultado es un conjunto de disservicios ecosistémicos -calor, escorrentía no infiltrada, pérdida de biodiversidad polinizadora- que rara vez se contabilizan frente a los servicios que la misma infraestructura verde podría prestar si estuviera diseñada como parte del metabolismo territorial, y no como un añadido estético posterior.

3.3.2. Estado del arte

El concepto de metabolismo social, formulado por Fischer-Kowalski y Haberl (1998), ofrece el marco de origen para analizar cuantitativamente los flujos de materia y energía entre una sociedad y su entorno biofísico, y para distinguir modos de producción según su intensidad de “colonización” de los ecosistemas de los que dependen. Sobre esa base, la literatura de metabolismo urbano (Kennedy et al., 2007) ha avanzado en modelar cuantitativamente los servicios ecosistémicos urbanos y rural-urbanos, incorporando el arbolado como una de las pocas infraestructuras urbanas capaces de prestar simultáneamente varios servicios de regulación -térmica, hídrica y de calidad del aire- sin consumo energético adicional. La herramienta i-Tree Eco, desarrollada por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (Nowak y Crane, 2002), ha permitido extender este modelado cuantitativo a contextos andinos, como se detalla en el Foco Tecnológico de este capítulo.

3.4. Desarrollo teórico-técnico

3.4.1. Metabolismo socioecológico: Colonización y rutas de regeneración

La “colonización de la naturaleza”, en el sentido preciso que le dan Fischer-Kowalski y Haberl (1998), designa las actividades socialmente organizadas que alteran deliberadamente los sistemas naturales -el drenaje de un humedal, la canalización de un río, la sustitución de la cobertura vegetal nativa por especies de crecimiento rápido- con el fin de incrementar el beneficio que la sociedad obtiene de ellos. El concepto es valioso precisamente porque no juzga la

intervención humana como ilegítima en sí misma, sino que ofrece un lenguaje para medir su intensidad y sus costos metabólicos: cuánta energía, agua y trabajo social se requieren para mantener artificialmente un ecosistema colonizado en el estado que la sociedad demanda. Una ruta de regeneración, en estos términos, no es la ausencia de colonización, sino una colonización de baja intensidad metabólica, que reduce el trabajo de mantenimiento externo al alinear la intervención con los flujos biofísicos preexistentes del territorio -por ejemplo, sustituyendo el riego artificial de parques urbanos por especies nativas adaptadas al régimen hídrico local.

3.4.2. Metabolismo urbano biocibernético: Ciudad y cuenca

Trasladado a la escala urbana, el metabolismo socioecológico se expresa en lo que Kennedy et al. (2007) definen como el conjunto de procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en una ciudad y que resultan en su crecimiento, la producción de energía útil y la eliminación de residuos. Leído en clave biocibernética, este metabolismo no es una cadena lineal de entradas y salidas, sino un sistema de bucles de retroalimentación entre la ciudad y su cuenca: el agua que la ciudad extrae de la cuenca alta regresa, transformada en escorrentía urbana acelerada, hacia la cuenca baja, alterando los caudales de los que la propia ciudad -y las comunidades río abajo- dependen. Un metabolismo urbano biocibernético gestionado con criterio regenerativo exige, por tanto, monitorear la ciudad y la cuenca como un único sistema, en el sentido que el Capítulo 2 atribuyó a la cibernética de segundo orden: la ciudad no observa la cuenca desde afuera, es un nodo metabólico dentro de ella.

3.4.3. El arbolado urbano como infraestructura viva

Dentro de ese metabolismo, el arbolado urbano ocupa una posición estructural única: es la única infraestructura de regulación microclimática y de captura de carbono capaz de crecer, autorrepararse y prestar múltiples servicios ecosistémicos simultáneos -sombra, evapotranspiración, intercepción de lluvia, remoción de contaminantes- sin requerir un aporte energético externo continuo. Nowak y Crane (2002) cuantificaron, a partir de datos de campo de diez ciudades estadounidenses, que los árboles urbanos del país almacenan en conjunto cientos de millones de toneladas de carbono, con una tasa de secuestro anual

que varía drásticamente según la cobertura arbórea y la proporción de árboles grandes y sanos en la población forestal urbana. Esta evidencia es la que sustenta el tratamiento del arbolado como infraestructura viva y no como ornamento: su valor de regulación microclimática es proporcional a la estructura -tamaño, edad, especie- de la población arbórea, no a la mera presencia de vegetación.

Foco tecnológico

El software i-Tree Eco, desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos a partir de la metodología UFORE (Nowak y Crane, 2002), permite valorar cuantitativa y económicamente la regulación microclimática, la remoción de contaminantes atmosféricos y la captura de carbono de un bosque urbano a partir de un inventario de parcelas de muestreo. Su aplicación ya cuenta con un precedente andino directo: en el valle de Aburrá, Colombia, un inventario de 398 parcelas estimó que el bosque urbano remueve 228 toneladas de contaminantes atmosféricos al año, con un valor aproximado de 2,1 millones de dólares (Arroyave et al., 2019). Un ejercicio equivalente en Ibarra permitiría trasladar el diagnóstico cualitativo del arbolado de la ciudad -descrito en la sección siguiente- a una valoración cuantitativa comparable.

3.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

3.5.1. Análisis de caso real

Dos estudios recientes sobre Ibarra permiten reconstruir, con datos propios de la ciudad, el diagnóstico metabólico que este capítulo propone. Una tesis de maestría sobre morfología urbana (Vásquez Bedón, 2022) midió in situ, mediante estaciones móviles a lo largo de dos ejes del centro histórico de Ibarra, la correlación entre variables microclimáticas y variables morfológicas de la ciudad, encontrando que la arborización, la orientación de las vías y el material de calzada están directamente relacionados con la variación de la temperatura registrada, lo que confirma la presencia activa del fenómeno de isla de calor urbana en una ciudad intermedia andina, no solo en las grandes metrópolis. En paralelo, un diagnóstico del propio autor sobre el arbolado urbano de Ibarra (Garrido Aguilar et al., 2023), basado en un censo de 119 individuos

pertenecientes a 25 familias y 34 géneros en dos parques centrales de la ciudad, encontró un predominio de especies exóticas sobre las nativas, con un 58 % de los individuos en estado fitosanitario de riesgo, un 40,3 % con afectaciones por desgarre o desmembramiento de ramas por acción antrópica y bioclimática, y un 33,6 % con plagas o enfermedades activas.

3.5.2. Resultados y discusión

Leídos en conjunto, ambos estudios revelan una desconexión metabólica: la ciudad reconoce, en su morfología, la necesidad de arbolado para mitigar la isla de calor (Vásquez Bedón, 2022), pero el arbolado efectivamente instalado no está diseñado para prestar ese servicio de manera óptima (Garrido Aguilar et al., 2023). El predominio de especies exóticas de bajo valor ecológico local, combinado con un estado fitosanitario deficiente en más de la mitad de los individuos censados, reduce la capacidad real de evapotranspiración y de captura de carbono que la estructura teórica del arbolado urbano -según Nowak y Crane (2002)- podría ofrecer. En términos de disservicios ecosistémicos, un árbol exótico mal adaptado al régimen hídrico local, con daño biomecánico activo, no solo aporta menos regulación microclimática que una especie nativa sana: puede convertirse en un pasivo de mantenimiento -riesgo de caída de ramas, mayor demanda de riego- que compite por los mismos recursos municipales que debería liberar. El potencial regenerativo de sustituir progresivamente esas especies por flora nativa adaptada a la cuenca de Ibarra es, en este sentido, tanto una medida de regulación microclimática como una medida de eficiencia metabólica municipal.

3.6. Cierre analítico

3.6.1. Conclusiones

La ciudad no es ajena al bosque: es el sumidero o el motor metabólico de su cuenca, según cómo se diseñe su infraestructura verde. El caso de Ibarra muestra que reconocer conceptualmente la importancia del arbolado no basta si la composición de especies y su estado fitosanitario no se gestionan con el mismo rigor técnico que cualquier otra infraestructura urbana crítica.

3.6.2. Perspectivas futuras

La integración obligatoria de modelos metabólicos -y de herramientas de valoración cuantitativa como i-Tree Eco, ya validadas en contextos andinos comparables- en los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) permitiría que la selección de especies del arbolado urbano deje de ser una decisión estética y se convierta en una decisión de ingeniería metabólica territorial.

3.6.3. Transición

Si el metabolismo urbano define los flujos de materia, energía e información del territorio, el modelo económico que rige sobre esos flujos define las reglas de su explotación o de su regeneración. El próximo capítulo enfrenta la bioeconomía regenerativa y la biomímesis frente a la economía tradicional de extracción de recursos.

3.7. Aparato pedagógico

3.7.1. Preguntas de metacognición

1. ¿De qué manera la importación masiva de alimentos desde otras provincias altera el metabolismo de nutrientes de los suelos del Geoparque Imbabura?
2. Si el 58 % del arbolado censado en los parques centrales de Ibarra presenta riesgo fitosanitario, ¿qué implicaciones tiene esto para la capacidad real de la ciudad de mitigar su isla de calor en el corto plazo?

3.7.2. Reto práctico

Calcule cualitativamente el flujo de agua de una hectárea de bosque seco frente a una hectárea urbana asfaltada, y proponga infraestructuras verdes para equilibrarlos, tomando en cuenta la composición de especies nativas frente a exóticas discutida en este capítulo.

3.8. Referencias bibliográficas

Arroyave, M., Posada, M., Nowak, D., y Hoehn, R. (2019). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia Forestal*, 22(1), 5–16. https://doi.org/10.14483/2256201X.13695

Fischer-Kowalski, M., y Haberl, H. (1998). Sustainable development: Socio-economic metabolism and colonization of nature. *International Social Science Journal,* 50(158), 573–587. https://doi.org/10.1111/1468-2451.00169

Garrido Aguilar, L. F., Carvajal Benavides, J. G., Valencia Valenzuela, X. G., Varela Molina, I. E. M., y Cuarán Guerrero, M. J. (2023). Diagnóstico del arbolado urbano en la ciudad de Ibarra, como base para una gestión de arbolado más humano. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 5613–5632. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5743

Kennedy, C., Cuddihy, J., y Engel-Yan, J. (2007). The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 43–59. https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107

Nowak, D. J., y Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution,* 116(3), 381–389. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7

Vásquez Bedón, E. M. (2022). *Islas de calor urbano* (ICU) y morfología urbana en el centro histórico de Ibarra [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio Institucional PUCE. https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/13584

Capítulo 4: Bioeconomía regenerativa, biomímesis y biorrefinerías: Redefiniendo el valor

Bioeconomía regenerativa, biomímesis y biorrefinerías: Redefiniendo el valor

Figura 4.

Bioeconomía regenerativa



4.1. Encabezado científico

4.1.1. Resumen / Abstract

Este capítulo expande los límites de la economía circular integrando Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y Biomímesis como motores tecnológicos de la Bioeconomía Regenerativa. A partir del modelo de la Economía Rosquilla o Doughnut Economics (Raworth, 2012, 2017), se define el espacio operativo seguro y justo para los bioemprendimientos del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura (UNESCO, 2019). Se analiza el diseño de bioemprendimientos biobasados escalables y el desarrollo de biorrefinerías territoriales para Productos Forestales No Maderables (PFNM), asegurando su acoplamiento a las tasas biológicas de regeneración del bosque seco andino.

Palabras Clave / Keywords

Biomímesis, Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), Bioemprendimientos Biobasados, Biorrefinerías, Economía Rosquilla.

4.2. Apertura pedagógica

4.2.1. Resultados de aprendizaje

1. Aplicar los principios de Biomímesis y de las Soluciones Basadas en la Naturaleza en el modelado de bioemprendimientos biobasados escalables.
2. Diseñar esquemas conceptuales de biorrefinerías forestales que respeten los límites biofísicos del modelo de la Economía Rosquilla.

4.2.2. Epígrafe

"Memento mori" - Recuerda que morirás, y con ello, recuerda los límites biofísicos del planeta. Ningún modelo económico infinito puede existir en un ecosistema finito.

4.3. Introducción y contextualización

4.3.1. Planteamiento del problema

Extraer biomasa renovable a tasas superiores a su capacidad de reposición sigue siendo, en esencia, un modelo extractivo, incluso cuando se lo etiqueta como “circular”. La economía circular convencional, centrada en cerrar ciclos de materiales técnicos, ha sido criticada por trasladar sin cuestionamiento su lógica de recirculación a los flujos biológicos, ignorando que estos dependen de fondos ecológicos -suelo fértil, agua, biodiversidad- cuya tasa de renovación no es negociable ni acelerable por la tecnología (Giampietro, 2019). En el bosque seco andino del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura, esta confusión conceptual tiene consecuencias tangibles: un proyecto puede presentarse como “bioeconómico” y, al mismo tiempo, agotar los renovales de una especie clave si el diseño del bioemprendimiento carece de un techo ecológico explícito. El reto de este capítulo es distinguir, con rigor operativo, entre una bioeconomía que

administra la escasez biofísica del territorio y una que simplemente la ignora bajo el disfraz de la sostenibilidad discursiva.

4.3.2. Estado del arte

Los avances recientes en biorrefinerías de tercera generación -basadas en biomasa algal y microbiana- coexisten con una revalorización de las biorrefinerías forestales de segunda generación adaptadas a contextos tropicales, como lo documenta el trabajo de Orejuela-Escobar et al. (2021) sobre bioeconomía circular y tecnología de cero residuos en el Ecuador. En paralelo, la biomímesis industrial, formalizada por Benyus (1997) bajo el principio de la naturaleza como modelo, medida y mentor, se consolida como marco de diseño para procesos productivos que imitan el metabolismo cerrado de los ecosistemas. La integración de la teoría de Raworth (2012, 2017) en entornos forestales andinos es todavía incipiente, pero ofrece una herramienta operativa para trasladar los límites planetarios a la escala de un territorio concreto: el corredor Ambuquí-Salinas-Mira del Geoparque Imbabura.

4.4. Desarrollo teórico-técnico

4.4.1. Bioeconomía regenerativa vs. economía circular (Modelo de la dona).

El Banco Central del Ecuador, en su primer ejercicio de medición sistemática, define la bioeconomía como la producción de bienes y servicios basados en el uso sostenible de los recursos biológicos y sus derivados, incluyendo los servicios ecosistémicos (Banco Central del Ecuador, 2025). Esta definición institucional sitúa al territorio -no solo al mercado- como unidad de análisis, y es coherente con la Tríada Territorial introducida en el Capítulo 1: la bioeconomía habita simultáneamente la biosfera, la sociosfera y la tecnosfera. Sin embargo, definir la bioeconomía no basta para hacerla regenerativa. Giampietro (2019) advierte que buena parte de la confusión conceptual alrededor de la “bioeconomía circular” proviene de aplicar, sin adaptación, la lógica de la economía circular industrial -diseñada para materiales técnicos infinitamente reciclables- a flujos biológicos que dependen de fondos ecológicos finitos y de tasas de regeneración biológicas, no técnicas. Un metal puede refundirse

indefinidamente; una hectárea de bosque seco andino no puede “reciclarse” más rápido que su propio ciclo fenológico.

El modelo de la Economía Rosquilla o Doughnut Economics (Raworth, 2012, 2017) ofrece una salida operativa a esta confusión. Raworth define un espacio seguro y justo para la actividad humana delimitado por dos fronteras: un piso social, compuesto por las necesidades básicas que ninguna persona debería tener insatisfechas, y un techo ecológico, formado por los límites planetarios que ningún proceso productivo debería sobrepasar. Trasladado a la escala territorial del Geoparque Imbabura, el piso social corresponde a un ingreso digno y estable para las familias que participan en la cadena de valor de un PFNM, mientras que el techo ecológico corresponde a la tasa de regeneración natural de la especie extraída -renovales de guarango, poblaciones de jaboncillo, cobertura del bosque seco remanente. Un bioemprendimiento se vuelve regenerativo, y no meramente circular, cuando ambos límites se diseñan de manera explícita y verificable desde el inicio del proyecto, y no como una corrección posterior a la sobreexplotación.

Esta distinción tiene consecuencias directas de política pública. Según la Cuenta Satélite de Bioeconomía, en 2023 la bioeconomía aportó aproximadamente el 12,3% del Producto Interno Bruto del Ecuador, mientras que la bioeconomía extendida -que incluye manufactura, logística y bioemprendimientos vinculados- representó un 9,9% adicional (Banco Central del Ecuador, 2025). Estas cifras revelan un sector con alto potencial de encadenamiento productivo, pero también con un riesgo estructural: si el crecimiento de ese encadenamiento no está anclado a un techo ecológico explícito por especie y por cuenca, la expansión estadística de la bioeconomía puede coexistir, sin contradicción aparente, con la erosión biofísica del territorio que la sostiene. Experiencias comparadas en bioeconomías forestales, como la síntesis de trayectorias hacia 2060 de Luhas et al. (2021), muestran que los objetivos de mitigación climática y de protección de la biodiversidad no convergen automáticamente: requieren un diseño institucional deliberado, similar al que propone el modelo de la Dona aplicado a escala de paisaje.

4.4.2. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y biomímesis: Inspiración evolutiva para la resiliencia territorial.

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza define las Soluciones Basadas en la Naturaleza como acciones para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados, que abordan desafíos sociales de forma efectiva y adaptativa, generando simultáneamente beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad (IUCN, 2020). El Estándar Global de la IUCN estructura esta definición en ocho criterios y aproximadamente veintiocho indicadores verificables, lo que convierte a las SbN en una herramienta auditable y no solo discursiva. En el contexto del Geoparque Imbabura, las SbN operan como la infraestructura viva del territorio: corredores de conectividad entre relictos de bosque seco, sistemas agroforestales con guarango y jaboncillo como especies nodrizas, y microcuencas restauradas que regulan el ciclo hídrico del corredor Ambuquí-Salinas-Mira.

La biomímesis, formalizada por Benyus (1997) en su obra fundacional, aporta el complemento tecnológico a las SbN. Mientras las SbN trabajan directamente sobre el ecosistema vivo, la biomímesis abstrae los principios de diseño de ese ecosistema -forma, proceso o sistema- y los traslada a procesos productivos humanos. Benyus (1997) propone entender a la naturaleza como modelo, medida y mentor: modelo porque ofrece diseños ya probados durante millones de años de evolución; medida porque establece el estándar de desempeño contra el cual evaluar una innovación, como la ausencia de residuos o la eficiencia energética a temperatura ambiente; y mentor porque enseña, a través de sus mecanismos de retroalimentación, por qué ciertas soluciones funcionan y otras no. Aplicado a la ingeniería forestal, este marco exige preguntar, ante cada decisión de diseño de un bioemprendimiento, qué haría el bosque en esa misma situación.

La síntesis operativa de ambos marcos ocurre en el diseño de biorrefinerías. Orejuela-Escobar et al. (2021) documentan, para el contexto ecuatoriano, una pirámide de conversión de biomasa que prioriza productos de alto valor y bajo

volumen -compuestos fitoquímicos, taninos, saponinas- antes de recurrir a la valorización energética de los residuos, replicando así la jerarquía de uso que un ecosistema forestal aplica de manera espontánea a su propia hojarasca y resina. Este principio de cascada, donde el subproducto de una extracción se convierte en materia prima de la siguiente, es la traducción industrial directa del principio de “cero residuos” que Benyus (1997) identifica como rasgo distintivo de los sistemas vivos maduros.

4.4.3. Biorrefinerías forestales y bioemprendimientos biobasados escalables para PFNM.

Las biorrefinerías se clasifican convencionalmente según la generación de su materia prima: primera generación para biomasa comestible, segunda generación para biomasa lignocelulósica no alimentaria, y tercera generación para biomasa algal o microbiana. Sin embargo, los PFNM andinos -taninos, saponinas, gomas, resinas- configuran una vía adicional, de extracción fitoquímica directa, que Orejuela-Escobar et al. (2021) sitúan en el mismo marco conceptual de la biorrefinería de segunda generación adaptada al contexto ecuatoriano: primero se extraen los metabolitos secundarios de alto valor y luego se procesa el remanente lignocelulósico. Dos especies del Geoparque Imbabura ilustran esta vía con particular claridad: el guarango *(Caesalpinia spinosa)* y el jaboncillo *(Sapindus saponaria).*

El guarango es una leguminosa nativa de la región andina cuyas vainas concentran taninos vegetales de uso industrial en curtiembre, alimentos y farmacia; su cadena productiva en Ecuador, Perú y Bolivia fue caracterizada tempranamente por el Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERACIÓN (2009), y Nieto y Barona (2007) documentaron su potencial agroindustrial y de exportación bajo esquemas de conservación productiva para el territorio ecuatoriano. El jaboncillo, por su parte, produce en el pericarpo de su fruto saponinas con propiedades tensoactivas naturales: Lozsan et al. (2017) determinaron para extractos crudos de Sapindus saponaria una concentración micelar crítica de entre 0,03 y 0,046 g/mL, una tensión superficial estable de 44 mN/m y un valor de balance hidrófilo-lipófilo de 14,3, comparable al de tensioactivos comerciales sintéticos. Estas propiedades convierten al jaboncillo

en materia prima viable para biosurfactantes de bajo impacto ambiental, una alternativa biobasada a los detergentes derivados del petróleo.

El diseño de un bioemprendimiento biobasado escalable para estas dos especies no consiste en maximizar el volumen exportado de vaina o pericarpo en bruto, sino en escalar la capacidad de procesamiento local sin sobrepasar el techo ecológico de regeneración de cada especie. Esto favorece unidades de extracción modulares y descentralizadas, replicables en función de la oferta biológica y de la capacidad local, en lugar de asumir que una planta industrial centralizada es siempre la opción óptima. La literatura de diseño y evaluación de biorrefinerías muestra que el desempeño de configuraciones de pequeña escala depende del contexto socioeconómico, ambiental y tecnológico del territorio, por lo que debe evaluarse integralmente antes de escalar (Solarte-Toro et al., 2023). En esta obra, por tanto, la escalabilidad se entiende como replicación condicionada por datos de oferta, sostenibilidad y viabilidad, no como una garantía automática de éxito.

Insight teórico

Una biorrefinería regenerativa imita el metabolismo del bosque: opera sin desperdicios, utilizando reacciones en cascada donde el subproducto de un proceso de extracción de PFNM alimenta inmediatamente al siguiente. Este principio de bio-imitación a escala de sistema -la biomímesis descrita por Benyus (1997)- transforma el residuo lignocelulósico del guarango o el jaboncillo en materia prima del siguiente eslabón: compost, biosurfactante o bioinsumo agrícola, replicando la ausencia de residuos que caracteriza a un bosque maduro.

4.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

4.5.1. Análisis de caso aplicado (diseño conceptual)

Se propone, como diseño conceptual y no como planta ya implementada, una biorrefinería modular descentralizada para la extracción de taninos del guarango (Caesalpinia spinosa) y saponinas del jaboncillo (Sapindus saponaria) en comunidades del cantón Urcuquí, dentro del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura (UNESCO, 2019). El planteamiento se apoya en la caracterización

productiva regional documentada por ECOBONA-INTERCOOPERACIÓN (2009) y Nieto y Barona (2007) para el guarango, en las propiedades tensoactivas de Sapindus saponaria determinadas por Lozsan et al. (2017), y en criterios contemporáneos de evaluación integral de biorrefinerías de pequeña escala (Solarte-Toro et al., 2023). La secuencia propuesta -trituración, extracción acuosa controlada y valorización del remanente- debe validarse mediante balances de masa, energía, calidad de extracto, toxicidad, costos y pruebas agronómicas antes de atribuir al residuo un uso seguro como enmienda.

4.5.2. Resultados y discusión

Para que un módulo comunitario de este tipo pueda calificarse como regenerativo, el volumen anual de acopio deberá mantenerse por debajo de un umbral de aprovechamiento sustentado en inventarios y tasas de regeneración verificadas de cada especie; además, el procesamiento local deberá demostrar que retiene valor y empleo sin desplazar costos ambientales hacia otras etapas. La replicación en varios puntos del territorio es, por tanto, una hipótesis de diseño que debe someterse a evaluación técnico-económica y socioambiental, no un resultado demostrado. Esta formulación convierte el techo ecológico y el piso social en condiciones auditables del proyecto, coherentes con Raworth (2012, 2017) y con enfoques de evaluación integral de biorrefinerías (Solarte-Toro et al., 2023).

4.6. Cierre analítico

4.6.1. Conclusiones

La biomímesis y las Soluciones Basadas en la Naturaleza son los motores tecnológicos que permiten que la bioeconomía no transgreda los límites metabólicos del paisaje. Sin un techo ecológico explícito y un piso social verificable -los dos límites del modelo de la Dona de Raworth (2012, 2017)- la etiqueta “bioeconómica” describe, en el mejor de los casos, una intención, y en el peor, una extracción convencional con mejor comunicación.

4.6.2. Perspectivas futuras

Creación de clústeres de biorrefinerías modulares comunitarias en los Andes ecuatorianos hacia 2035, escalando horizontalmente el modelo conceptual guarango–jaboncillo hacia otros PFNM del Geoparque Imbabura, y su integración progresiva a la Cuenta Satélite de Bioeconomía del Banco Central del Ecuador (2025) como categoría diferenciada de bioemprendimiento territorial.

4.6.3. Transición

Con un modelo económico y tecnológico claro -la Bioeconomía Regenerativa anclada en la Economía Rosquilla, las SbN y la biomímesis- se requiere ahora una arquitectura capaz de restaurar el paisaje a todas las escalas. La siguiente sección desarrolla la Arquitectura de la Restauración (RER).

4.7. Aparato pedagógico

4.7.1. Preguntas de metacognición

Si una comunidad Kichwa exporta masivamente resinas, logrando altos ingresos, pero agotando los renovales, ¿dónde se ubica este bioemprendimiento en el modelo de la Dona?

4.7.2. Reto práctico

Aplique un principio de biomímesis (por ejemplo, forma, proceso o sistema) para diseñar una Solución Basada en la Naturaleza que capture agua de neblina en el bosque seco.

4.8. Referencias bibliográficas

Banco Central del Ecuador. (2025). *Cuenta Satélite de Bioeconomía*. https://contenido.bce.fin.ec/documentos/informacioneconomica/cuentasnacionales/satelites/ix_satelite_bieconomia.html

Benyus, J. M. (1997). Biomimicry: Innovation inspired by nature. William Morrow.

Giampietro, M. (2019). On the circular bioeconomy and decoupling: Implications for sustainable growth. *Ecological Economics,* 162, 143–156. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.001

International Union for Conservation of Nature. (2020). IUCN *Global Standard for Nature-based Solutions:* A user-friendly framework for the verification, design and scaling-up of NbS (1.ª ed.). IUCN. https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2020.08.en

Lozsan, A., Rivas, I., Rodríguez, G., Martínez, S., & Pérez, M. A. (2017). Determination of surface-active characteristics of a natural surfactant extracted from Sapindus saponaria*. Tenside Surfactants Detergents*, 54(2), 109–117. https://doi.org/10.3139/113.110491

Luhas, J., Mikkilä, M., Kylkilahti, E., Miettinen, J., Malkamäki, A., Pätäri, S., Korhonen, J., Pekkanen, T. L., Tuppura, A., Lähtinen, K., Autio, M., Linnanen, L., Ollikainen, M., & Toppinen, A. (2021). Pathways to a forest-based bioeconomy in 2060 within policy targets on climate change mitigation and biodiversity protection. *Forest Policy and Economics*, 131, Artículo 102551. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102551

Nieto, C., & Barona, N. (2007). El guarango: Una opción agroindustrial y de exportación para conservación productiva. *Fundación Desde El Surco.*

Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C., & Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: *The nexus. Journal of Bioresources and Bioproducts,* 6(2), 83–107. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.004

Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERACIÓN. (2009). La tara (Caesalpinia spinosa) en Perú, Bolivia y Ecuador: *Análisis de la cadena productiva en la región* (Serie Investigación y Sistematización, Vol. 2). ECOBONA-INTERCOOPERACIÓN.

Raworth, K. (2012). A safe and just space for humanity: Can we live within the doughnut? Oxfam Discussion Paper*. Oxfam GB.*

Raworth, K. (2017). Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st-century economist. *Chelsea Green Publishing*.

Solarte-Toro, J. C., Ortiz-Sanchez, M., & Cardona Alzate, C. A. (2023). Sustainability analysis of biorefineries based on country socio-economic and environmental context: A step-by-step way for the integral analysis of biomass upgrading processes. *Renewable Energy,* 206, 1147–1157. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.065

UNESCO. (2019). Imbabura UNESCO Global Geopark. *International Geoscience and Geoparks Programme*. https://www.unesco.org/en/iggp/imbabura-unesco-global-geopark

Capítulo 5: El bucle de restauración biocibernética: Ecología del paisaje y etnopaisajes

El bucle de restauración biocibernética: Ecología del paisaje y etnopaisajes

Figura 5.

El bucle de restauración biocibernética



5.1. Encabezado científico

5.1.1. Resumen / Abstract

Este capítulo constituye el núcleo técnico de la obra. Define la secuencia operativa del bucle de Restauración Ecológica Regenerativa (RER) y la desglosa en tres escalas anidadas: la escala Micro, centrada en los rasgos funcionales y la autecología de las especies; la escala Meso, que integra la ecología del paisaje, los etnopaisajes andinos, la sucesión secundaria y la conectividad espacial; y la escala Macro, orientada a la coordinación y resiliencia del bioma frente al cambio climático.

Palabras Clave / Keywords

Ecología del Paisaje, Etnopaisajes, Sucesión Secundaria, Rasgos Funcionales, Restauración Ecológica Regenerativa.

5.2. Apertura pedagógica

5.2.1. Resultados de aprendizaje

1. Implementar el bucle de RER aplicando métricas de ecología del paisaje.
2. Analizar la plasticidad geoclimática y la influencia cultural en los etnopaisajes andinos.

5.2.2. Epígrafe

“Restaurar el territorio exige restaurar también las relaciones que lo sostienen.” - Axioma pedagógico de la obra.

5.3. Introducción y contextualización

5.3.1. Planteamiento del problema

Gran parte de los proyectos globales de reforestación fracasan no por falta de plantones, sino por ignorar dos dimensiones que determinan si un bosque restaurado persiste en el tiempo: la ecología espacial del paisaje en el que se inserta y la matriz cultural -el etnopaisaje- que ha modelado ese territorio durante siglos. Fleischman et al. (2020) documentan que buena parte de las iniciativas masivas de plantación fracasan porque los árboles se siembran en lugares incorrectos, con especies inadecuadas y sin el respaldo de las comunidades locales que deberían sostener su cuidado a largo plazo. En los Andes ecuatorianos, esta omisión tiene una dimensión adicional: el paisaje productivo no es un lienzo vacío sobre el cual plantar, sino un etnopaisaje -un territorio culturalmente modelado durante generaciones, con sistemas de manejo del agua, del suelo y de la vegetación que preceden a cualquier intervención técnica (Canziani, 2009). Restaurar sin leer esta matriz cultural equivale a diseñar un ecosistema funcionalmente correcto, pero socialmente huérfano, condenado a la misma tasa de abandono que documentan los estudios globales de fracaso en reforestación.

5.3.2. Estado del arte

La ecología de paisajes fragmentados dispone hoy de un aparato métrico maduro, consolidado desde el desarrollo del programa FRAGSTATS (McGarigal & Marks, 1995), que permite cuantificar composición, configuración y conectividad del paisaje con precisión reproducible. En paralelo, la integración cuantitativa de variables culturales en la restauración -los etnopaisajes- avanza con mayor lentitud, apoyada en la sistematización de los paisajes culturales andinos realizada por Canziani (2009) y en los estándares internacionales de restauración ecológica de la Society for Ecological Restoration (Gann et al., 2019), que desde su segunda edición incorporan explícitamente el eje social y cultural como componente no negociable del éxito restaurativo, al mismo nivel que los indicadores de estructura, composición y función del ecosistema.

5.4. Desarrollo teórico-técnico

5.4.1. Secuencia operativa de RER.

El bucle de Restauración Ecológica Regenerativa que estructura este capítulo no es una secuencia lineal de siembra y monitoreo, sino un ciclo retroalimentado que toma como referencia el marco de los Estándares Internacionales para la Práctica de la Restauración Ecológica (Gann et al., 2019). Estos estándares definen el éxito restaurativo mediante seis atributos ecosistémicos -ausencia de amenazas, composición de especies, estructura de la comunidad, función ecosistémica, conectividad del paisaje e intercambios con el entorno- evaluados frente a un ecosistema de referencia explícito, y no frente a un ideal abstracto de bosque nativo. La operacionalización de RER en este libro parte, precisamente, de fijar ese ecosistema de referencia antes de cualquier intervención: sin un punto de comparación biofísico y cultural claro, no existe manera rigurosa de declarar que la restauración avanza.

La secuencia operativa recorre las tres escalas que estructuran el resto del capítulo -Micro, Meso y Macro- no de forma jerárquica sino como un bucle donde cada escala retroalimenta a las otras. La selección de especies para un consorcio de restauración (escala Micro) depende de qué papel deban cumplir esas especies en la conectividad del paisaje (escala Meso); y la configuración

espacial de un corredor de restauración depende, a su vez, de las trayectorias de migración altitudinal que el cambio climático impone al bioma completo (escala Macro). Ignorar este carácter recursivo del bucle -tratando, por ejemplo, la selección de especies como una decisión puramente fisiológica desconectada del paisaje- es precisamente el patrón de fracaso identificado por Fleischman et al. (2020) en la reforestación convencional.

5.4.2. Escala micro: Autecología funcional, regulación estomática y plasticidad geoclimática.

En la escala Micro, la pregunta operativa de RER no es qué especie plantar, sino qué rasgo funcional necesita el ecosistema de referencia en ese punto del bucle. Los rasgos funcionales -altura máxima, densidad de madera, área foliar específica, profundidad radicular, comportamiento estomático- determinan cómo cada especie participa en el reensamblaje del ecosistema, y su análisis cuantitativo mediante matrices de rasgos es hoy un procedimiento estandarizado en ecología funcional (Laliberté & Legendre, 2010).

La regulación estomática merece atención particular en el bosque seco andino, donde el estrés hídrico estacional es el filtro ambiental dominante. McDowell et al. (2008) formalizaron el continuo isohídrico-anisohídrico como marco para entender la supervivencia vegetal durante la sequía: las especies isohídricas cierran sus estomas de manera temprana ante la caída del potencial hídrico, priorizando evitar el fallo hidráulico a costa de una fotosíntesis reducida, mientras que las especies anisohídricas mantienen las estomas abiertas por más tiempo, tolerando potenciales hídricos más negativos para sostener la asimilación de carbono. Esta distinción no es un dato fisiológico anecdótico: determina directamente qué especies pueden anclar la primera cohorte de un consorcio de restauración en un etnopaisaje con temporada seca marcada, y cuáles deben reservarse para etapas posteriores de la sucesión, cuando la cobertura del dosel ya modera el déficit de presión de vapor a nivel de sotobosque.

La plasticidad geoclimática -la capacidad de una especie de expresar rasgos funcionales distintos según el gradiente altitudinal y de humedad en que se encuentre- es el criterio que finalmente decide su inclusión o exclusión de un programa de RER en escenarios de cambio climático. Una especie de baja

plasticidad, aunque sea nativa y ecológicamente valiosa en su nicho actual, puede convertirse en un pasivo restaurativo si el gradiente climático del sitio se desplaza más rápido de lo que su rango de tolerancia fisiológica permite absorber, un dilema que se retoma con detalle en la Pregunta de Metacognición de la sección 7.

5.4.3. Escala meso: Ecología del paisaje, etnopaisajes, métricas espaciales y conectividad.

La escala Meso traslada la pregunta de RER del individuo a la matriz: ¿cómo se distribuyen, en el espacio, los parches restaurados respecto a los relictos de vegetación nativa remanente? El aparato metodológico de la ecología del paisaje, consolidado desde FRAGSTATS (McGarigal & Marks, 1995), ofrece métricas de composición (proporción de cada tipo de cobertura), configuración (tamaño, forma y aislamiento de los parches) y conectividad (facilidad con la que organismos, semillas o polen se desplazan entre parches). Un programa de RER que no calcula estas métricas antes de decidir dónde restaurar corre el riesgo de crear “islas verdes” ecológicamente correctas, pero funcionalmente aisladas, incapaces de sostener flujo génico ni recolonización tras una perturbación.

Sobre esta matriz espacial se superpone el etnopaisaje: la lectura cultural del territorio que Canziani (2009) sistematizó para los Andes, entendiendo el paisaje como el resultado acumulado de siglos de manejo humano del agua, el suelo y la vegetación, y no como un sustrato neutro sobre el cual opera la ecología. En el corredor Ambuquí-Salinas-Mira, el etnopaisaje incluye sistemas de riego prehispánicos, patrones de uso agrícola en terrazas y una memoria colectiva sobre qué especies han acompañado históricamente a las comunidades locales. Ignorar esta capa -restaurando, por ejemplo, un corredor de conectividad ecológica que atraviesa una chacra activa sin negociar su trazado con la familia que la trabaja- reproduce exactamente el patrón de fracaso social que documentan Fleischman et al. (2020): un diseño técnicamente óptimo, pero sin respaldo comunitario, condenado a revertirse en pocos años.

La sucesión secundaria proporciona el eje temporal que conecta ambas capas. Chazdon (2014) demuestra que los bosques secundarios neotropicales, lejos de ser una etapa degradada a corregir con plantación intensiva, son sistemas

dinámicos capaces de recuperar estructura y función en función de la historia de uso previo del suelo y de la conectividad con fuentes de semillas cercanas. Esto significa que, en muchos puntos del etnopaisaje andino, la intervención de RER más costo-efectiva no es plantar, sino remover activamente la barrera a la regeneración natural -pastoreo descontrolado, fuego recurrente, aislamiento de fuentes de semilla- y monitorear la trayectoria sucesional resultante, reservando la plantación activa para los sitios donde la matriz circundante ya no ofrece bancos de semillas ni rebrotes viables.

5.4.4. Escala macro: Coordinación y resiliencia de bioma.

En la escala Macro, RER deja de operar sobre un sitio o un corredor y pasa a coordinarse con la trayectoria del bioma completo bajo cambio climático. La evidencia empírica más directa de que esta coordinación es necesaria proviene del estudio de Feeley et al. (2011) sobre migración altitudinal de árboles andinos: a partir de censos repetidos en catorce parcelas forestales entre los 950 y los 3.400 metros de altitud en el sureste peruano, los autores documentaron que la mayoría de los géneros arbóreos andinos desplazaron su distribución media hacia mayores altitudes en respuesta al aumento de temperatura, aunque a un ritmo insuficiente frente a la velocidad del calentamiento regional.

Esta discrepancia entre la velocidad del cambio climático y la velocidad de respuesta biológica de las especies obliga a que un programa de RER a escala de bioma no fije sus objetivos de restauración exclusivamente sobre el rango altitudinal actual de cada especie, sino que anticipe corredores de migración asistida hacia cotas más frescas. La coordinación de bioma, en este sentido, cierra el bucle de RER: las decisiones de la escala Micro sobre plasticidad geoclimática y las de la escala Meso sobre conectividad del paisaje sólo tienen sentido regenerativo si se orientan, en conjunto, a sostener la capacidad del bioma de desplazarse en el espacio al ritmo que el clima le exige.

Foco tecnológico

El empleo de los paquetes FD (Laliberté & Legendre, 2010) y mFD (Magneville et al., 2022) en RStudio permite construir matrices de rasgos funcionales y calcular índices de diversidad funcional multidimensional -riqueza, dispersión,

divergencia funcional- para seleccionar consorcios de especies con complementariedad de nicho verificable, en lugar de basarse únicamente en la disponibilidad de plantones en vivero.

5.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

5.5.1. Análisis de caso aplicado (modelo de aula bosque)

Integración de especies nativas -Ceiba pentandra e Inga spp.- en Sistemas Agroforestales (SAF) modelados como circuitos cerrados de nutrientes en el “Aula Bosque”. El diseño del SAF se apoya en dos rasgos funcionales complementarios: la arquitectura de dosel alto y raíz profunda de Ceiba pentandra, que ancla la estructura vertical del sistema y facilita la conectividad con el dosel de los relictos boscosos circundantes, y la capacidad fijadora de nitrógeno de Inga spp., documentada por Leblanc et al. (2006) en un experimento de descomposición de mulch verde en agrocultivo en callejones: las hojas de Inga liberan nitrógeno de forma progresiva durante su descomposición, sosteniendo la fertilidad del suelo sin insumos externos y controlando la vegetación herbácea competidora mediante la cobertura del mantillo.

5.5.2. Resultados y discusión

La combinación de ambas especies en el Aula Bosque cierra un circuito de nutrientes análogo al descrito en el Capítulo 4 para las biorrefinerías: la poda periódica de Inga alimenta el suelo del sistema, sosteniendo el crecimiento de Ceiba pentandra y de los cultivos asociados sin depender de fertilización externa. En términos de las tres escalas de RER, el resultado es medible en cada una: en la escala Micro, la complementariedad de rasgos entre ambas especies -fijación de nitrógeno frente a estructura vertical- reduce la competencia directa por recursos; en la escala Meso, el SAF actúa como parche de conectividad entre relictos boscosos, incrementando los índices de conectividad calculables con el marco de FRAGSTATS (McGarigal & Marks, 1995); y en la resiliencia hídrica del sistema, la cobertura de dosel combinada modera el déficit de presión de vapor en el sotobosque, favoreciendo la recuperación de la sucesión secundaria en los bordes del Aula Bosque en línea con los patrones documentados por Chazdon (2014) para bosques secundarios neotropicales.

5.6. Cierre analítico

5.6.1. Conclusiones

La RER es, por diseño, multiescalar: ignorar la escala Micro -la fisiología y los rasgos funcionales de cada especie- produce consorcios de restauración fisiológicamente inviables, mientras que ignorar la escala Meso -el etnopaisaje y la conectividad del paisaje- produce restauraciones técnicamente correctas, pero socialmente huérfanas y espacialmente aisladas. Ambos fallos debilitan el mismo bucle regenerativo, y ninguno se compensa reforzando exclusivamente la otra escala.

5.6.2. Perspectivas futuras

Modelamiento predictivo de la migración altitudinal de especies de bosque seco por cambio climático, extendiendo el enfoque de Feeley et al. (2011) a los corredores del Geoparque Imbabura para anticipar, antes de que ocurra el desplazamiento observado, qué especies del etnopaisaje andino requerirán corredores de migración asistida hacia cotas más frescas.

5.6.3. Transición

¿Cómo medir el éxito de estas intervenciones en tiempo real? La tecnosfera y los sensores proveen la respuesta en el siguiente capítulo.

5.7. Aparato pedagógico

5.7.1. Preguntas de metacognición

Si la plasticidad geoclimática de una especie nativa es baja, ¿debería excluirse de los programas de RER en escenarios de cambio climático?

5.7.2. Reto práctico

Construya una matriz de rasgos funcionales básicos para tres especies (Molle, Espino, Cholán) justificando su complementariedad en un etnopaisaje andino.

5.8. Referencias bibliográficas

Canziani, J. (2009). Ciudad y territorio en los Andes. Fondo Editorial de la *Pontificia Universidad Católica del Perú.*

Chazdon, R. L. (2014). Second growth: The promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation. *University of Chicago Press*. https://doi.org/10.7208/chicago/9780226118109.001.0001

Feeley, K. J., Silman, M. R., Bush, M. B., Farfan, W., Cabrera, K. G., Malhi, Y., Meir, P., Revilla, N. S., Quisiyupanqui, M. N. R., & Saatchi, S. (2011). Upslope migration of Andean trees. *Journal of Biogeography,* 38(4), 783–791. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x

Fleischman, F., Basant, S., Chhatre, A., Coleman, E. A., Fischer, H. W., Gupta, D., Güneralp, B., Kashwan, P., Khatri, D., Muscarella, R., Powers, J. S., Ramprasad, V., Rana, P., Solorzano, C. R., & Veldman, J. W. (2020). *Pitfalls of tree planting show why we need people-centered natural climate solutions.* BioScience, 70(11), 947–950. https://doi.org/10.1093/biosci/biaa094

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decleer, K., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration (2.ª ed.). *Restoration Ecology*, 27(S1), S1–S46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

Laliberté, E., & Legendre, P. (2010). A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1), 299–305. https://doi.org/10.1890/08-2244.1

Leblanc, H. A., Nygren, P., & McGraw, R. L. (2006). Green mulch decomposition and nitrogen release from leaves of two Inga spp. in an organic alley-cropping practice in the humid tropics. *Soil Biology and Biochemistry,* 38(2), 349–358. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.05.012

Magneville, C., Loiseau, N., Albouy, C., Casajus, N., Claverie, T., Escalas, A., Leprieur, F., Maire, E., Mouillot, D., & Villéger, S. (2022). mFD: An R package to compute and illustrate the multiple facets of functional diversity. Ecography, 2022(1), *Artículo e05904*. https://doi.org/10.1111/ecog.05904

McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yepez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x

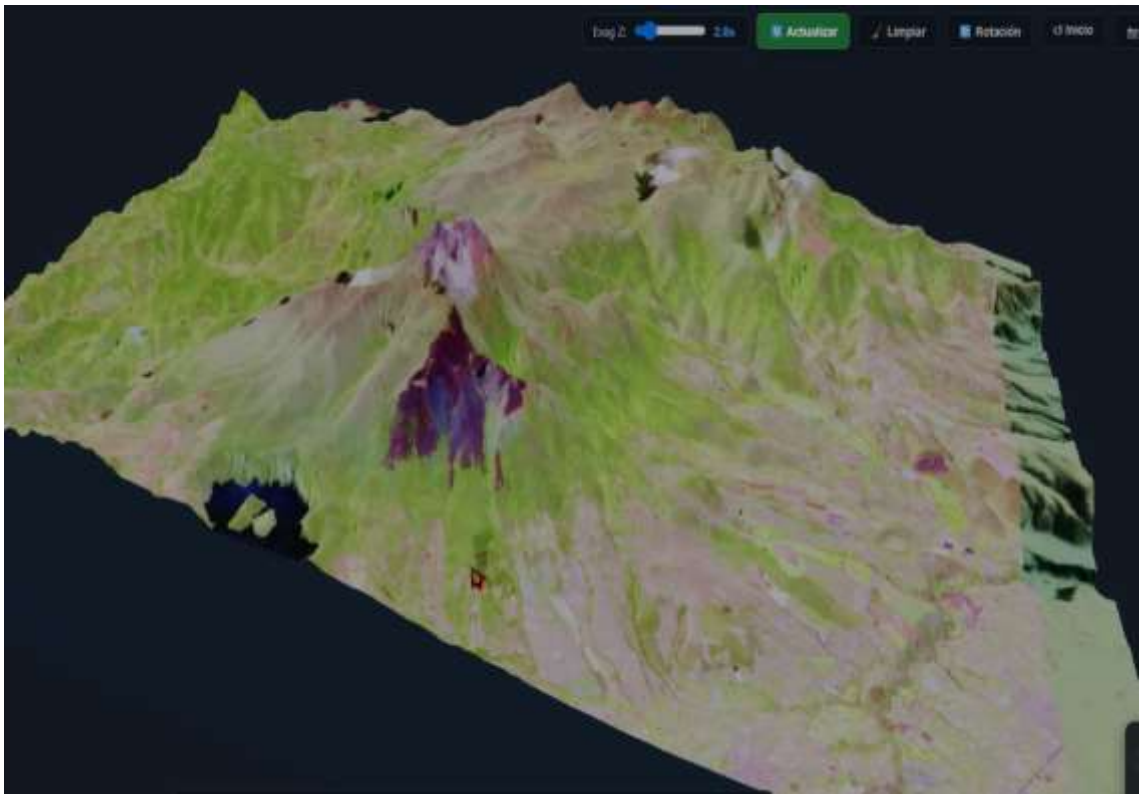
McGarigal, K., & Marks, B. J. (1995). FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure (Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351). *USDA Forest Service,* Pacific Northwest Research Station. https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351

Capítulo 6: Tecnologías de monitoreo, gemelos digitales y señales de alerta temprana

Tecnologías de monitoreo, gemelos digitales y señales de alerta temprana

Figura 6.

Tecnologías de monitoreo



6.1. Encabezado científico

6.1.1. Resumen / Abstract

La tecnosfera provee los instrumentos operativos de la cibernética territorial: los sensores que perciben, los canales que transmiten y los algoritmos que interpretan el estado del bosque seco andino. Este capítulo detalla la arquitectura multicapa -física, de datos, cibernética y de gobernanza- que sostiene al “Bosque Inteligente” como sistema de observación continua. Se examina la teledetección de índices espectrales (NDVI/NDWI) procesados en plataformas de computación geoespacial en la nube, la instrumentación IoT de bajo consumo energético y, como núcleo conceptual del capítulo, la identificación de transiciones críticas mediante el fenómeno del “enlentecimiento crítico” (critical slowing down): el aumento de la autocorrelación temporal y la varianza de los índices de

vegetación como huella estadística de la pérdida de resiliencia antes de que la mortalidad forestal sea visible. El capítulo cierra examinando las implicaciones éticas del gobierno de estos datos sobre territorios habitados por comunidades indígenas y campesinas, situando la vigilancia tecnológica dentro de un marco de gestión adaptativa en tiempo real.

Palabras Clave / Keywords

Gemelos Digitales Forestales, Internet de las Cosas (IoT), NDVI/NDWI, Enlentecimiento Crítico, Bosque Inteligente, Google Earth Engine.

6.2. Apertura pedagógica

6.2.1. Resultados de aprendizaje

1. Estructurar la arquitectura de monitoreo de un ecosistema forestal utilizando IoT, teledetección y computación en la nube, distinguiendo sus capas físicas, de datos, cibernética y de gobernanza.
2. Interpretar señales de “enlentecimiento crítico” (aumento de autocorrelación y varianza en series temporales de NDVI/NDWI) como predictores estadísticos de un colapso ecosistémico inminente.

6.2.2. Epígrafe

“Un sistema que no mide ni retroalimenta su desempeño no puede aprender de él.” - Axioma pedagógico de la obra.

6.3. Introducción y contextualización

6.3.1. Planteamiento del problema

"La crisis ambiental contemporánea no puede comprenderse como un fenómeno aislado ni como una suma de problemas dispersos. Se expresa, más bien, como una convergencia de presiones sobre el clima, la biodiversidad, el agua, los suelos, la energía y los modelos de producción y consumo. En este marco, la transformación digital aparece como una posibilidad estratégica para mejorar la capacidad de monitoreo, análisis y decisión ambiental. El Internet de las Cosas (IoT) ambiental debe comprenderse como una arquitectura tecnológica orientada a observar, registrar, transmitir, procesar e interpretar variables del entorno para

apoyar decisiones sostenibles, convirtiendo señales físicas, químicas o biológicas en datos útiles para comprender procesos ecológicos y anticipar riesgos." (Carvajal-Benavides et al., 2026). El monitoreo forestal tradicional -inventarios periódicos, sobrevuelos ocasionales, reportes post-incendio- es esencialmente estático y post-mortem: documenta la degradación una vez consumada, pero carece de la resolución temporal necesaria para anticipar los puntos de no retorno de un ecosistema sometido a estrés hídrico crónico. En el bosque seco andino, donde la mortalidad arbórea puede acelerarse en cuestión de semanas tras superarse un umbral fisiológico de conductividad hidráulica, un ciclo de monitoreo anual equivale, en términos cibernéticos, a un sistema sin retroalimentación: el territorio colapsa antes de que la señal de alarma complete su recorrido institucional.

6.3.2. Estado del arte

La última generación de investigación en Forestería 4.0 y 5.0 desplaza el centro de gravedad desde el inventario discreto hacia el Gemelo Digital como infraestructura de vigilancia continua, integrando sensores terrestres, drones y satélites en arquitecturas jerárquicas de Internet de las Cosas (IoT) orientadas a la detección temprana de incendios, la contabilidad de carbono y la gestión climáticamente inteligente del bosque (Arion et al., 2026). En paralelo, la ecología de sistemas complejos ha consolidado un cuerpo teórico robusto -los indicadores genéricos de alerta temprana derivados de la teoría de bifurcaciones- que permite anticipar, con base puramente estadística, la proximidad de una transición crítica en cualquier sistema dinámico, incluidos los bosques (Scheffer et al., 2009). La convergencia de ambas líneas -la capacidad técnica para observar en continuo y la capacidad teórica para interpretar la desestabilización- es el objeto de estudio de este capítulo.

6.4. Desarrollo teórico-técnico

6.4.1. Arquitectura multicapa (Física, datos, cibernética, gobernanza).

El Bosque Inteligente puede describirse como un sistema cibernético de cuatro capas superpuestas, cada una con su propia lógica operativa pero acopladas entre sí en un único bucle de retroalimentación territorial.

La capa física es el sustrato sensorial: estaciones meteorológicas, sensores de humedad de suelo, dendrómetros, cámaras trampa, drones con cargas multiespectrales y constelaciones satelitales de acceso abierto. La literatura reciente sobre Internet de las Cosas aplicado a la silvicultura describe esta capa como una red heterogénea que combina nodos fijos de bajo consumo -conectados mediante protocolos de área amplia y baja potencia (LPWAN) como LoRaWAN o NB-IoT, capaces de operar meses con una sola carga solar- con plataformas móviles (drones, vehículos terrestres) que cubren, bajo demanda, las zonas de difícil acceso del territorio (Arion et al., 2026).

La capa de datos organiza el flujo bruto en información utilizable: ingestión, limpieza, geoetiquetado, almacenamiento en la nube y estandarización mediante metadatos interoperables. Es en esta capa donde la escala del problema exige infraestructura de cómputo distribuido, ya que una sola serie temporal de NDVI para una cuenca mediana implica procesar miles de escenas satelitales acumuladas durante dos décadas.

La capa cibernética es el núcleo analítico: los algoritmos que transforman datos en señales de decisión -modelos de aprendizaje automático para clasificación de estrés hídrico, detección de anomalías espectrales, cálculo de indicadores de enlentecimiento crítico- y que cierran el bucle de retroalimentación mediante alertas automatizadas. Sin esta capa, el Bosque Inteligente sería solamente un archivo de datos; con ella, se convierte en un sistema capaz de percibir su propio estado de resiliencia.

Finalmente, la capa de gobernanza traduce la señal técnica en decisión institucional: protocolos de activación de los Comités de Operaciones de Emergencia (COE), acuerdos de corresponsabilidad con las comunidades del

territorio y marcos normativos sobre quién controla, accede y se beneficia del dato generado. Ninguna de las tres capas anteriores tiene sentido biocibernético sin esta última: un sistema que detecta, pero no decide no es un sistema retroalimentado, sino un panóptico inerte.

6.4.2. Gemelos digitales y teledetección continua (NDVI/NDWI).

Un Gemelo Digital forestal es una representación computacional del ecosistema que se actualiza en tiempo cuasi real a partir de flujos de datos físicos, permitiendo simular escenarios de manejo, anticipar trayectorias de degradación y ensayar decisiones antes de aplicarlas sobre el territorio vivo. La revisión sistemática más reciente sobre el tema documenta la consolidación de arquitecturas de Gemelo Digital Forestal que integran sensores IoT, series de teledetección y modelos analíticos, situándolas como el estadio más avanzado de la digitalización forestal -posterior a la automatización operativa de “Forestería 4.0” e integrada con la dimensión participativa de “Forestería 5.0” (Arion et al., 2026).

El insumo primario de este Gemelo Digital son los índices espectrales de vegetación. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) explota el contraste entre la fuerte absorción de clorofila en la banda roja y la alta reflectancia foliar en el infrarrojo cercano, funcionando como proxy de la actividad fotosintética y la densidad del dosel. Su complemento, el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI), fue propuesto específicamente para aislar el contenido de agua líquida en el tejido vegetal a partir de dos bandas del infrarrojo cercano poco sensibles a la dispersión atmosférica, por lo que constituye un indicador independiente -no sustituto- del NDVI, particularmente sensible al inicio del estrés hídrico antes de que se manifieste en la pérdida visible de verdor (Gao, 1996).

El procesamiento de series temporales largas de estos índices -necesario para calcular tendencias de degradación o indicadores de resiliencia- exige capacidad de cómputo que excede la de un computador convencional. Las plataformas de computación geoespacial en la nube resuelven esta limitación al colocar el algoritmo junto a los datos en lugar de descargar terabytes de imágenes

satelitales al equipo del investigador, democratizando el acceso a análisis planetarios que antes requerían supercómputo institucional (Gorelick et al., 2017).

6.4.3. Transiciones críticas y “enlentecimiento crítico” (critical slowing down).

La teoría de sistemas dinámicos predice que, a medida que un sistema se aproxima a un punto de bifurcación -un umbral más allá del cual una perturbación menor desencadena un cambio de régimen abrupto e históricamente difícil de revertir-, su capacidad de recuperación ante perturbaciones pequeñas se degrada progresivamente. Este fenómeno, denominado enlentecimiento crítico, deja una huella estadística genérica y detectable en cualquier serie temporal suficientemente larga: la autocorrelación de rezago uno y la varianza tienden a aumentar de forma sostenida antes de que ocurra la transición, con independencia del sistema particular que se observe -ecosistemas, mercados financieros o el clima (Scheffer et al., 2009).

Aplicado a bosques, este marco permite convertir una serie temporal de NDVI en un indicador de resiliencia sin necesidad de esperar a que la mortalidad arbórea sea visible. El estudio planetario más completo hasta la fecha, que integró índices satelitales de vegetación con aprendizaje automático para el periodo 2000-2020, documentó una declinación estadísticamente significativa de la resiliencia en bosques tropicales, áridos y templados -asociada a limitaciones hídricas crecientes y mayor variabilidad climática-, mientras que los bosques boreales mostraron, en promedio, una tendencia divergente de resiliencia creciente, probablemente favorecida por el calentamiento y la fertilización por CO_2 (Forzieri et al., 2022). Para el bosque seco andino, sometido a un régimen de precipitación ya marginal, esta evidencia global funciona como advertencia: la ausencia de mortalidad visible no equivale a la ausencia de pérdida de resiliencia, y el enlentecimiento crítico ofrece la ventana de intervención que el monitoreo tradicional no puede ofrecer.

El uso de Google Earth Engine (GEE) -una plataforma de computación geoespacial en la nube que aloja el catálogo público de imágenes Landsat y Sentinel junto con capacidad de procesamiento paralelo a escala planetaria (Gorelick et al., 2017)- permite calcular, en minutos y sin infraestructura local costosa, series temporales de dos décadas de NDVI para toda una microcuenca, detectando el aumento sostenido de autocorrelación que delata la pérdida de resiliencia del dosel antes de que la mortalidad sea visible a simple vista.

6.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

6.5.1. Análisis de caso aplicado (propuesta de monitoreo multiescala)

El corredor seco de Ambuquí, dentro del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura, constituye un laboratorio vivo idóneo para ensayar la arquitectura descrita en la sección 6.1. Se propone un protocolo de monitoreo de estrés hídrico que combina vuelos periódicos de drones equipados con cámaras multiespectrales -capaces de calcular NDVI y NDWI a resolución de centímetros sobre parcelas críticas del bosque seco- con la serie histórica de NDVI/NDWI de plataformas satelitales procesada en Google Earth Engine, siguiendo el catálogo de aproximaciones de alerta temprana basadas en vehículos aéreos no tripulados sistematizado por Ewane et al. (2023) para la detección de estrés hídrico antes de la mortalidad arbórea.

6.5.2. Resultados y discusión

El valor de este diseño no reside únicamente en la resolución espacial del dron -que permite localizar árboles o rodales individuales en estrés antes de que el patrón sea visible a escala satelital-, sino en su función de validación cruzada: los datos de campo calibran y corrigen la interpretación de la serie satelital de largo plazo, reduciendo el riesgo de falsas alarmas o de detecciones tardías propio de sistemas de una sola fuente. Al integrar ambas escalas dentro del bucle cibernético descrito en 6.1, el sistema puede priorizar las zonas de mayor vulnerabilidad hídrica dentro del corredor seco y trasladar esa priorización, como información procesable, al Comité de Operaciones de Emergencia (COE) local,

transformando un mapa de riesgo en un protocolo de alerta temprana ante incendios forestales con tiempo de reacción útil.

6.6. Cierre analítico

6.6.1. Conclusiones

La tecnología no salva el bosque; provee el dato oportuno para que el bucle humano-institucional tome la decisión a tiempo. La arquitectura multicapa solo cumple su función biocibernética cuando la capa de gobernanza cierra el ciclo: sin corresponsabilidad institucional y comunitaria, el Gemelo Digital más sofisticado es apenas un archivo de datos sin retroalimentación.

6.6.2. Perspectivas futuras

La siguiente frontera técnica es la autonomía energética de la capa física: redes de sensores IoT alimentados con biomasa o microenergía solar residual, capaces de operar de manera indefinida en bosques remotos sin mantenimiento periódico, extendiendo la cobertura del Bosque Inteligente precisamente hacia los territorios donde la infraestructura eléctrica convencional nunca llegará.

6.6.3. Transición

Los datos generados por el Bosque Inteligente no sirven si no hay un sistema social estructurado para actuar mediante una planificación multinivel. El siguiente capítulo aborda precisamente esa arquitectura institucional: cómo el dato biocibernético se traduce en gobernanza territorial efectiva.

6.7. Aparato pedagógico

6.7.1. Preguntas de metacognición

¿Qué riesgos éticos y de seguridad territorial implica generar un Gemelo Digital de acceso abierto sobre recursos de comunidades indígenas? Los principios CARE de gobernanza de datos indígenas (Collective Benefit, Authority to Control, Responsibility, Ethics) advierten que los marcos convencionales de datos abiertos -orientados a maximizar la interoperabilidad y el libre acceso- pueden entrar en tensión directa con el derecho de los pueblos indígenas a controlar la producción, el uso y la reutilización de la información sobre sus

territorios, recursos y conocimientos (Carroll et al., 2020). Un Gemelo Digital que localiza con precisión de centímetros fuentes de agua, sitios sagrados o zonas de recolección de productos forestales no maderables puede, sin ninguna intención maliciosa de por medio, exponer a una comunidad a la extracción no consentida de recursos o a la vigilancia externa de sus prácticas de manejo territorial. La pregunta que el estudiante debe resolver no es si la tecnología debe existir, sino quién decide qué capas de resolución se publican, bajo qué consentimiento y con qué beneficio de retorno para la comunidad cuyo territorio fue datificado.

6.7.2. Reto práctico

Describa los componentes (sensores, software, actores) de una capa de datos para monitorear el caudal en una microcuenca del Geoparque.

6.8. Referencias bibliográficas

Arion, I. D., Morar, I. M., Truța, A. M., Chereches, I. A., Isarie, V. I., & Arion, F. H. (2026). Internet of Things (IoT)-based applications in smart forestry: A conceptual and technological analysis. *Forests,* 17(1), Artículo 44. https://doi.org/10.3390/f17010044

Carroll, S. R., Garba, I., Figueroa-Rodríguez, O. L., Holbrook, J., Lovett, R., Materechera, S., Parsons, M., Raseroka, K., Rodriguez-Lonebear, D., Rowe, R., Sara, R., Walker, J. D., Anderson, J., & Hudson, M. (2020). The CARE principles for Indigenous Data Governance. *Data Science Journal,* 19(1), Artículo 43. https://doi.org/10.5334/dsj-2020-043

Carvajal-Benavides, J. G., Chang-Gómez, M. A., Tenazoa-Vasquez, G., Gómez-Tuesta, L., López-Vinatea, L. A., Gómez-Matos, H. J., García-Navarro, M. R., & García-Lino, M. E. (2026). *Transformación Digital para la Sostenibilidad Ambiental. IoT, Big Data y cambio climático*. Oriente-Manabí Editorial. https://doi.org/10.63618/omeditorial/122

Ewane, E. B., Mohan, M., Bajaj, S., Galgamuwa, G. A. P., Watt, M. S., Arachchige, P. P., Hudak, A. T., Richardson, G., Ajithkumar, N., Srinivasan, S., Corte, A. P. D., Johnson, D. J., Broadbent, E. N., de-Miguel,

S., Bruscolini, M., Young, D. J. N., Shafai, S., Abdullah, M. M., Jaafar, W. S. W. M., Doaemo, W., Silva, C. A., & Cardil, A. (2023). Climate-change-driven droughts and tree mortality: Assessing the potential of UAV-derived early warning metrics. *Remote Sensing*, 15(10), Artículo 2627. https://doi.org/10.3390/rs15102627

Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N. G., Ramdane, A., & Cescatti, A. (2022). Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, 608(7923), 534–539. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9

Gao, B.-C. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E. H., Rietkerk, M., & Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260), 53–59. https://doi.org/10.1038/nature08227

Capítulo 7: Gobernanza, planificación integral y el modelo de sistema viable (VSM)

Gobernanza, planificación integral y el modelo de sistema viable (VSM)

Figura 7.

Planificación integral



7.1. Encabezado científico

7.1.1. Resumen / Abstract

Este capítulo traduce la cibernética organizacional de Stafford Beer a la gestión ambiental territorial. Se implementa el Modelo de Sistema Viable (VSM) como marco diagnóstico para estructurar la gobernanza de un territorio vivo, entendiendo cada uno de sus cinco subsistemas -implementación, coordinación, control, inteligencia e identidad- como funciones cibernéticas indispensables para que una institución de gestión ambiental sobreviva a la complejidad del entorno que administra. A partir de este marco, se analiza la necesidad de que los Planes de Manejo Integral mantengan coherencia vertical entre sus escalas estratégica (largo plazo), táctica (mediano plazo) y operativa (corto plazo), y se sitúa esta articulación dentro de los enfoques de gobernanza policéntrica y cogestión adaptativa que la literatura sobre sistemas socioecológicos ha consolidado como respuesta a la gestión de recursos de uso común. El capítulo

cierra proponiendo el VSM como herramienta de auditoría institucional para geoparques y áreas protegidas, anticipando la discusión sobre memoria cultural y ecología política que desarrolla el capítulo siguiente.

Palabras Clave / Keywords

Modelo de Sistema Viable (VSM), Planificación Estratégica, Táctica y Operativa, Gobernanza Policéntrica, Cogestión Adaptativa, Cibernética Organizacional.

7.2. Apertura pedagógica

7.2.1. Resultados de aprendizaje

1. Aplicar los cinco subsistemas del Modelo de Sistema Viable al análisis diagnóstico de una institución de gestión ambiental territorial.
2. Alinear los objetivos de la restauración forestal en escalas estratégica, táctica y operativa, identificando los puntos de ruptura de la retroalimentación entre niveles de gobierno.

7.2.2. Epígrafe

“Gobernar un sistema vivo exige que la información llegue a quien puede actuar sobre ella.” - Axioma pedagógico de la obra.

7.3. Introducción y contextualización

7.3.1. Planteamiento del problema

Las políticas públicas de reforestación fracasan de manera recurrente no por ausencia de presupuesto o de voluntad técnica, sino por una desconexión estructural entre los niveles que deberían operar como un único sistema retroalimentado: los ministerios formulan metas estratégicas de cobertura forestal a veinte años, los gobiernos municipales traducen -o no traducen- esas metas en programas tácticos con presupuesto y cronograma a tres o cinco años, y los técnicos de campo ejecutan -o improvisan- acciones operativas de plantación y mantenimiento en el terreno concreto, muchas veces sin conocer la meta estratégica que en teoría orienta su trabajo diario. El resultado es un sistema donde cada nivel optimiza su propia función sin que exista un mecanismo homeostático que module la varianza entre niveles: los ministerios

anuncian metas que los municipios no pueden financiar, y los municipios asignan recursos a actividades que la evidencia de campo ya descartó como ineficaces.

7.3.2. Estado del arte

La cibernética organizacional desarrollada por Stafford Beer desde la década de 1970 ofrece un lenguaje formal para diagnosticar exactamente este tipo de patología institucional: el Modelo de Sistema Viable (VSM) describe las condiciones estructurales mínimas que cualquier organización necesita para mantenerse viable frente a la complejidad de su entorno (Beer, 1985). Su aplicación al análisis de sostenibilidad y complejidad organizacional ha sido desarrollada explícitamente por Espinosa et al. (2008), y el VSM ha sido aplicado de forma creciente al gobierno de recursos naturales y a la autogestión de comunidades y asociaciones indígenas, demostrando su capacidad para hacer visibles los cuellos de botella de comunicación entre escalas de decisión que la gobernanza convencional de recursos de uso común tiende a dar por resueltos (Espinosa & Duque, 2018). En paralelo, la literatura sobre sistemas socioecológicos ha consolidado dos marcos complementarios -la gobernanza policéntrica (Ostrom, 2010) y la cogestión adaptativa (Folke et al., 2005)- que comparten con el VSM la misma intuición estructural: ningún centro único de decisión puede procesar toda la variedad de un territorio vivo, y la resiliencia institucional depende de diseñar canales de retroalimentación multinivel en lugar de jerarquías de mando unidireccionales.

7.4. Desarrollo teórico-técnico

7.4.1. Traducción de los cinco subsistemas de Beer a la gobernanza ambiental.

El VSM postula que toda organización viable -capaz de mantener su identidad y sobrevivir en un entorno cambiante- necesita replicar cinco funciones cibernéticas interconectadas, independientemente de su tamaño o de si administra una empresa, un municipio o un geoparque (Beer, 1985).

El Sistema 1 corresponde a las unidades operativas: los guardaparques, los viveristas comunitarios, las brigadas de control de incendios, los técnicos que ejecutan directamente las actividades de manejo sobre el territorio. Es la

instancia donde el bosque real se toca; sin unidades operativas viables y con autonomía suficiente para responder a variaciones locales, ningún sistema superior tiene sobre qué actuar.

El Sistema 2 es la función de coordinación: los protocolos, los calendarios compartidos y los canales de comunicación que evitan que las unidades operativas entren en conflicto entre sí -por ejemplo, que dos brigadas programen quemas controladas en fechas que generan un riesgo acumulado, o que dos programas de reforestación compitan por el mismo vivero comunitario sin saberlo.

El Sistema 3 ejerce el control de la operación en curso: audita el desempeño de las unidades del Sistema 1, negocia recursos entre ellas y garantiza la cohesión del "aquí y ahora" institucional. Es, típicamente, la función que cumple la dirección técnica de un comité de gestión territorial.

El Sistema 4 mira hacia afuera y hacia el futuro: es la función de inteligencia que monitorea el entorno -cambio climático, política nacional, mercados de carbono, tecnologías emergentes de teledetección descritas en el capítulo anterior- y que alimenta a la organización con los escenarios que necesita para adaptarse antes de que el entorno la obligue a hacerlo por la fuerza.

Finalmente, el Sistema 5 sostiene la identidad y la política del conjunto: los valores, el propósito último y los acuerdos fundacionales que arbitran cuando el Sistema 3 (la operación del presente) y el Sistema 4 (las demandas del futuro) entran en tensión, como ocurre casi siempre que una oportunidad de desarrollo económico compite con un objetivo de conservación.

7.4.2. Planes de manejo integral: articulación estratégica, táctica y operativa.

Un Plan de Manejo Integral coherente debe replicar la misma lógica multinivel del VSM en su estructura temporal. La escala estratégica fija, a un horizonte de diez a veinte años, la identidad y los objetivos de largo plazo del territorio -equivalente funcional del Sistema 5 y del Sistema 4 combinados-; la escala táctica traduce esos objetivos en programas de mediano plazo con metas cuantificables, presupuesto asignado y responsables institucionales -la función

del Sistema 3-; y la escala operativa concreta, a un horizonte de meses o de una temporada, las acciones específicas de campo -la función del Sistema 1, coordinada por el Sistema 2.

La patología descrita en el planteamiento del problema de este capítulo es, en términos de Beer, un colapso de la retroalimentación (feedback) entre estas tres escalas: cuando la escala estratégica emite una meta sin canal de retorno que le informe si la escala táctica dispone de los recursos para ejecutarla, el sistema completo pierde variedad reguladora y la meta estratégica se convierte en lo que la literatura sobre autogestión indígena describe como una promesa sin sustento operativo, incapaz de generar el aprendizaje que sostiene la autogestión sostenible de un territorio (Espinosa & Duque, 2018).

7.4.3. Gobernanza policéntrica y cogestión adaptativa.

La gobernanza policéntrica describe sistemas donde múltiples centros de decisión, formalmente independientes entre sí pero sujetos a un marco común de reglas, ajustan mutuamente sus relaciones sin depender de una autoridad jerárquica única (Ostrom, 2010). Aplicado a un geoparque o a un corredor de bosque seco gestionado conjuntamente por ministerios, gobiernos locales, asociaciones comunitarias y organizaciones no gubernamentales, este marco reconoce que ninguno de esos actores posee, por separado, la variedad de conocimiento y de capacidad de acción necesaria para gestionar la totalidad del territorio; la resiliencia del sistema depende, precisamente, de que existan múltiples nodos capaces de responder a nivel local sin esperar instrucción de un centro único que, casi siempre, reacciona con demasiado retraso frente a una amenaza territorial concreta como un incendio o una invasión de tierras.

La cogestión adaptativa complementa este diseño estructural con una dimensión de aprendizaje social: la gobernanza de sistemas socioecológicos resilientes se sostiene en organizaciones puente que conectan actores de distintos niveles, en liderazgos que sostienen confianza y visión compartida, y en la capacidad institucional de usar una crisis -un incendio forestal severo, una sequía extrema- como oportunidad de reorganización antes que como mero fracaso a sancionar (Folke et al., 2005). Un Plan de Manejo Integral diseñado bajo este enfoque no es, entonces, un documento estático que se revisa cada década, sino un ciclo

continuo de ajuste entre lo que la escala operativa aprende en el terreno y lo que la escala estratégica redefine en consecuencia.

Insight teórico

El Sistema 5 en el VSM (Identidad y Política) aplicado a un Geoparque corresponde a la cosmovisión y los acuerdos fundacionales del territorio; es el ancla ética del sistema, el criterio último que decide qué se conserva incluso cuando la presión de mercado o la urgencia operativa empujan en sentido contrario.

7.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

7.5.1. Análisis de caso aplicado (auditoría institucional propuesta)

Se propone una auditoría cibernética -utilizando el VSM como instrumento diagnóstico, siguiendo la metodología de mapeo por niveles de recursión validada en la gestión territorial multiescala (Espinosa & Duque, 2018)- del Comité de Gestión del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura, evaluando la congruencia entre sus planes operativos, tácticos y estratégicos. El ejercicio consiste en mapear cada instancia real del Comité -mesas técnicas, direcciones de la Prefectura, gobiernos municipales miembros, brigadas comunitarias- contra los cinco subsistemas del modelo, identificando para cada uno si la función cibernética correspondiente está efectivamente cubierta, duplicada o ausente.

7.5.2. Resultados y discusión

La aplicación sistemática de este mapeo suele revelar un patrón recurrente en instituciones territoriales multinivel: los Sistemas 1 (unidades operativas de campo) y 5 (identidad y política, generalmente bien anclada en la declaratoria fundacional del geoparque) tienden a estar razonablemente definidos, mientras que el cuello de botella se concentra en el Sistema 3 -la función de control y asignación de recursos entre unidades- y en el canal de retroalimentación entre el Sistema 3 y el Sistema 4, que en la práctica institucional suele traducirse en la ausencia de un mecanismo formal que traslade el aprendizaje de campo hacia la revisión de la estrategia de mediano plazo. Diagnosticar esta ausencia con el

vocabulario preciso del VSM permite a un comité de gestión dejar de atribuir el problema, de manera difusa, a “falta de coordinación”, y dirigir en cambio el rediseño institucional hacia el canal de comunicación específico que está efectivamente roto.

7.6. Cierre analítico

7.6.1. Conclusiones

Una planificación sin retroalimentación operativa es un documento muerto; una operación sin dirección estratégica es activismo ciego. El VSM no es una metáfora administrativa importada del mundo corporativo: es un conjunto de condiciones estructurales de viabilidad que, cuando se ignoran, predicen con precisión el tipo de fracaso institucional que la gestión ambiental latinoamericana experimenta de forma reiterada.

7.6.2. Perspectivas futuras

El rediseño de las mallas curriculares de Forestería hacia el horizonte de 2050 -bajo el paradigma de la Forestería 4.0 descrito en el capítulo anterior- deberá incorporar la formación explícita de planificadores de gobernanza: profesionales capaces de diagnosticar la arquitectura institucional de un territorio con el mismo rigor técnico con que hoy se diagnostica su cobertura vegetal.

7.6.3. Transición

La gobernanza institucional no está completa sin el componente humano profundo: la memoria cultural y la ecología política. El siguiente capítulo aborda precisamente esa dimensión, examinando cómo el Sistema 5 -la identidad del territorio- se construye históricamente y qué relaciones de poder atraviesan la definición misma de qué se considera un “recurso” que gobernar.

7.7. Aparato pedagógico

7.7.1. Preguntas de metacognición

Si el gobierno central impone una meta estratégica pero no asigna recursos a la escala táctica (municipios), ¿qué predeciría el modelo VSM? El modelo anticipa una ruptura del canal de retroalimentación entre el Sistema 5/4 (que emite la

meta) y el Sistema 3 (que debería traducirla en programas ejecutables): sin recursos, la escala táctica no puede cumplir su función de control y asignación, y la meta estratégica se degrada en lo que Beer describiría como “variedad no absorbida” -una directiva que existe en el papel pero que el sistema no tiene capacidad estructural de procesar-. El síntoma observable de este colapso no es la ausencia de reforestación, sino su ejecución fragmentada, discontinua y dependiente de la voluntad individual de funcionarios puntuales, precisamente porque no existe la infraestructura institucional que sostenga la acción más allá de esa voluntad.

7.7.2. Reto práctico

Redacte un objetivo estratégico, uno táctico y uno operativo para un plan de manejo integral de prevención de incendios en el bosque seco.

7.8. Referencias bibliográficas

Beer, S. (1985). Diagnosing the system for organizations. *John Wiley & Sons.*

Espinosa, A., & Duque, C. (2018). Complexity management and multi-scale governance: A case study in an Amazonian Indigenous Association. *European Journal of Operational Research*, 268(3), 1006–1020. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.049

Espinosa, A., Harnden, R., & Walker, J. (2008). A complexity approach to sustainability-Stafford Beer revisited. *European Journal of Operational Research,* 187(2), 636–651. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.03.023

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 30(1), 441–473. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511

Ostrom, E. (2010). Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. *Global Environmental Change*, 20(4), 550–557. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.004

Capítulo 8: Ecología política y la sabiduría como algoritmo territorial

Ecología política y la sabiduría como algoritmo territorial

Figura 8.

Ecología



8.1. Encabezado científico

8.1.1. Resumen / Abstract

Este capítulo aborda la dimensión humana de la restauración ecológica desde la ecología política, entendida como el análisis de las relaciones de poder que determinan el acceso, el uso y los beneficios de los recursos territoriales (Osborne et al., 2021). Se argumenta que la memoria biocultural andina -el conjunto de saberes, prácticas y reglas de decisión transmitidas intergeneracionalmente- constituye técnicamente un algoritmo adaptativo de gestión territorial, en la línea de lo documentado por Berkes et al. (2000) para sistemas de conocimiento ecológico tradicional en distintas regiones del planeta.

Se conceptualiza a los Etnopaisajes del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura como sistemas coevolutivos en los que el paisaje físico y el tejido social se producen mutuamente, siguiendo la categoría de “paisaje cultural” reconocida por la UNESCO desde 1992. El capítulo examina, además, cómo las intervenciones tecnocráticas de restauración, cuando ignoran estas estructuras de saber y gobernanza local, reproducen injusticia espacial (Soja, 2010) y pueden derivar en dinámicas de exclusión análogas a la “conservación de fortaleza” documentada por West et al. (2006). Se discuten, finalmente, los principios bioéticos que debieran regir la distribución de beneficios en los proyectos de Restauración Ecológica Regenerativa (RER) del corredor Ambuquí-Salinas-Mira.

Palabras Clave / Keywords

Memoria Biocultural, Ecología Política, Justicia Espacial, Etnopaisajes, Bioética.

8.2. Apertura pedagógica

8.2.1. Resultados de aprendizaje

1. Integrar saberes ancestrales locales en diseños técnicos de restauración forestal.
2. Analizar proyectos de RER desde la perspectiva crítica de la justicia espacial.

8.2.2. Epígrafe

“El territorio no es un escenario: es una relación viva entre memoria, poder y cuidado.” - Axioma pedagógico de la obra.

8.3. Introducción y contextualización

8.3.1. Planteamiento del problema

Las intervenciones técnicas puras dirigidas desde una racionalidad tecnocrática -que privilegia variables biofísicas medibles (cobertura, biomasa, tasas de sobrevivencia) por sobre las estructuras sociales que sostienen el territorio- tienden a marginar a las poblaciones locales de los procesos de decisión. La literatura sobre “conservación de fortaleza” documenta cómo, durante buena

parte del siglo XX, la creación de áreas protegidas se sustentó en el desplazamiento de comunidades bajo la premisa de que la actividad humana era incompatible con la conservación (West et al., 2006). Este patrón sigue manifestándose contemporáneamente cuando los proyectos de restauración forestal -incluidos los de reforestación masiva y los mecanismos de compensación de carbono- se diseñan sin atender los regímenes de tenencia, las estructuras de gobernanza comunitaria ni las relaciones de poder preexistentes en el territorio (Osborne et al., 2021). El resultado es una injusticia espacial: una distribución desigual, en el propio espacio, de los costos, los beneficios y la capacidad de decisión sobre el territorio que se pretende regenerar (Soja, 2010).

8.3.2. Estado del arte

Frente a este diagnóstico, la ecología política territorial ha mostrado que lugar, identidad, conocimiento y naturaleza se coproducen históricamente, en vez de operar como variables independientes (Escobar, 2008). La etnoecología -campo que documenta los sistemas de clasificación, manejo y cosmovisión con que los pueblos originarios interpretan su entorno- y el reconocimiento internacional de la categoría de “paisaje cultural” por parte del Comité de Patrimonio Mundial de la UNESCO desde 1992 abren una vía distinta: valorar el paisaje no solo por sus atributos biofísicos, sino por la coevolución histórica entre naturaleza y sociedad que lo produjo. En el campo específico de la restauración ecológica, la última década consolida un giro similar: Robinson et al. (2021) sostienen que la Década de la ONU para la Restauración de los Ecosistemas (2021–2030) solo alcanzará resultados duraderos si se sustituye la extracción unilateral de conocimiento ecológico tradicional por un compromiso ético de escucha profunda hacia los pueblos indígenas. En la misma línea, Martin et al. (2026) sostienen que buena parte de la práctica restaurativa contemporánea aborda la justicia de manera superficial, mediante formas tokenistas de participación, y que solo la restauración efectivamente liderada por comunidades locales logra ser, a la vez, ecológicamente efectiva y socialmente transformadora.

8.4. Desarrollo teórico-técnico

8.4.1. Etnopaisajes: Coevolución paisaje físico – tejido social.

Un Etnopaisaje -término operativo que adoptamos en este capítulo para nombrar los ensamblajes territoriales del Geoparque Imbabura donde la matriz biofísica (terrazas de origen prehispánico, sistemas de acequias, relictos de bosque seco, chaquiñanes) es inseparable de las prácticas, los rituales agrícolas y las reglas de uso que las comunidades del corredor Ambuquí-Salinas-Mira sostienen sobre ella- encuentra respaldo conceptual en la categoría de “paisaje cultural” que el Comité de Patrimonio Mundial de la UNESCO incorporó en 1992 a las Directrices Prácticas para la aplicación de la Convención de 1972, definida como “obras combinadas de la naturaleza y del hombre” (UNESCO, 1972/2023). De las tres categorías que dicha normativa distingue -los paisajes diseñados, los evolutivos (fósiles o continuos) y los asociativos-, el bosque seco andino de Imbabura corresponde a un paisaje evolutivo continuo: mantiene un rol social activo en la sociedad contemporánea, ligado a un proceso de evolución en curso, y a la vez conserva huellas materiales significativas de su desarrollo histórico. Desde la óptica biocibernética que estructura esta obra, esto significa que la Sociosfera no es un factor externo que “impacta” a la Biosfera, sino un componente interno del mismo sistema, cuya retirada -por desplazamiento, migración o pérdida de las prácticas de manejo- desestabiliza tanto al tejido social como a la trama biofísica que dependía de él. "La consolidación de una Cultura Forestal Regenerativa, a través de la Educación Ambiental para la Sostenibilidad (EAS), constituye una estrategia esencial para afrontar los desafíos socioecológicos derivados de la urbanización acelerada, la pérdida de cobertura vegetal y la desconexión entre las comunidades y su entorno natural. El arbolado urbano y rural no debe ser considerado únicamente como un elemento estético o decorativo, sino como una infraestructura ecológica vital que ofrece múltiples servicios ecosistémicos, incluyendo la regulación térmica, la mejora de la calidad del aire, el soporte a la biodiversidad y el fortalecimiento del bienestar psicosocial de la ciudadanía." (Carvajal-Benavides et al., 2025).

8.4.2. Memoria biocultural como algoritmo de manejo territorial adaptativo.

La propuesta central de este capítulo es que el “saber ancestral” no debe leerse en clave folclórica ni como reliquia cultural, sino como una estructura de reglas de decisión sometida a un ciclo continuo de retroalimentación empírica. Esta lectura coincide con la conclusión central del trabajo de Berkes et al. (2000), quienes, tras revisar sistemas de conocimiento ecológico tradicional en contextos tan distintos como el Ártico, el Pacífico Sur y los Andes, documentaron una diversidad recurrente de prácticas -manejo de múltiples especies, rotación de recursos, gestión de la heterogeneidad del paisaje- sostenidas por mecanismos sociales de generación, acumulación y transmisión de conocimiento, y por instituciones locales que fijan reglas de regulación social. En términos biocibernéticos -y en coherencia con el capítulo 2 de esta obra-, estas reglas operan como un algoritmo adaptativo: perciben una señal del entorno (una helada tardía, la floración de una especie indicadora), la comparan contra un umbral construido por generaciones de observación, y disparan una acción de manejo (adelantar la siembra, proteger un relicto, redistribuir el agua de riego). La diferencia con un algoritmo formal no está en la estructura lógica, sino en el soporte: en lugar de código, la memoria biocultural se codifica en rituales, toponimia y prácticas colectivas como la minga, que -según documentan López Arévalo y Morquecho Salto (2025) para comunidades puruhá de Chimborazo- no es solo trabajo comunitario voluntario, sino una tecnología social que articula reciprocidad (ayni), redistribución y transmisión de saberes en un mismo dispositivo operativo. Perder ese soporte -por migración, ruptura intergeneracional o sustitución de las lenguas originarias- no equivale a perder una tradición: equivale, en sentido estricto, a borrar el algoritmo antes de haberlo transcrito.

Insight teórico

Un “saber ancestral” no es un mito; en términos biocibernéticos, es un conjunto de reglas de decisión refinadas por retroalimentación empírica a lo largo de cientos de años.

8.5. Justicia espacial, distribución de beneficios y principios bioéticos.

Cuando el diseño de un proyecto de restauración omite esta arquitectura de saber y gobernanza, no solo pierde información técnica valiosa: genera, en el sentido que Soja (2010) da al término, una injusticia espacial, es decir, una distribución desigual, en el propio espacio, de los recursos, los servicios y la capacidad de decisión sobre el territorio. El extremo histórico de esta dinámica es la llamada “conservación de fortaleza”: la creación de áreas protegidas mediante el desplazamiento de comunidades bajo la premisa de que la presencia humana es incompatible con la conservación, patrón que West et al. (2006) documentaron a escala global y que persiste hoy bajo formas más sutiles -zonificaciones que excluyen sin compensar, calendarios de manejo impuestos que ignoran los ciclos rituales, proyectos de compensación de carbono que no reconocen la tenencia consuetudinaria-. Frente a este riesgo, el Political Ecology Playbook propuesto por Osborne et al. (2021) plantea diez principios operativos para la restauración -entre ellos clarificar los derechos de tenencia y acceso locales, fortalecer las organizaciones comunitarias y otorgar mayor poder de decisión a los grupos locales- que funcionan, en el lenguaje de esta obra, como un protocolo bioético mínimo: ninguna intervención sobre la Biosfera es legítima si no reconoce primero a la Sociosfera como sujeto de derechos y no solo como “parte interesada” a consultar. En la misma dirección, Martin et al. (2026) advierten que buena parte de la práctica restaurativa actual trata la justicia de manera superficial, mediante formas tokenistas de participación y reparto de beneficios, y sostienen que solo la restauración efectivamente liderada por comunidades locales -apoyada en sus propios sistemas de conocimiento y de gobernanza- logra ser, a la vez, ecológicamente efectiva y socialmente transformadora. Aplicado al Geoparque Imbabura, esto implica que la auditoría de un proyecto de RER debe incluir, junto a los indicadores de cobertura y biomasa, un indicador de congruencia biocultural: en qué medida la intervención fortalece o erosiona la memoria biocultural, la minga y las estructuras locales de decisión sobre el etnopaisaje intervenido.

8.6. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

8.6.1. Análisis de caso real

La minga comunitaria practicada en las parroquias del corredor Ambuquí-Salinas-Mira ejemplifica, en clave biocibernética, un sistema operativo territorial descentralizado: convoca trabajo colectivo voluntario para tareas de interés común -limpieza de acequias, apertura de senderos, reforestación de quebradas-, articulado por normas de reciprocidad (ayni) que no dependen de un mando jerárquico único, sino de la confianza acumulada entre familias a lo largo de generaciones (López Arévalo y Morquecho Salto, 2025). Leída con las categorías de gobernanza de bienes comunes que Ostrom (1990) documentó en sistemas de riego y bosques comunales de larga duración en distintas partes del mundo, la minga cumple varias de las condiciones que esa autora identificó como determinantes del éxito institucional: límites claros del grupo de usuarios, reglas de uso ajustadas a las condiciones locales y mecanismos de monitoreo ejercido por los propios usuarios. Auditada como un caso de gobernanza policéntrica, la minga no sustituye a la institucionalidad formal del GAD parroquial ni del Comité de Gestión del Geoparque (capítulo 7), sino que opera como su nivel operativo más fino: el que efectivamente ejecuta, en el terreno, las decisiones tácticas y estratégicas de la gobernanza institucional.

8.6.2. Resultados y discusión

La integración de la pedagogía del “Aula Bosque” -sesiones de aprendizaje que trasladan la enseñanza forestal fuera del aula convencional hacia el bosque, la chacra o la propia minga- responde a un riesgo documentado empíricamente en la Amazonía ecuatoriana: Hohenthal y Veintie (2024) encontraron que, en los colegios interculturales bilingües de la provincia de Pastaza, los temas socioambientales suelen abordarse como fenómenos globales desconectados de los saberes y el territorio local, y que la participación efectiva de los jóvenes en la minga comunitaria -más que la instrucción formal en aula- es uno de los pocos espacios donde ese conocimiento situado logra transmitirse de manera intergeneracional. Trasladado al bosque seco andino, esto sugiere que ningún programa de Forestería 4.0 (capítulo 7) puede sustituir la participación directa y sostenida de los estudiantes en las mingas y calendarios agroecológicos de su

propia comunidad; en el mejor de los casos, puede complementarla con instrumentación y datos, nunca reemplazarla como fuente primaria de memoria biocultural.

8.7. Cierre analítico

8.7.1. Conclusiones

No hay restauración ecológica posible sin restauración social: los diez principios del Political Ecology Playbook (Osborne et al., 2021) y la evidencia reunida por Martin et al. (2026) convergen en que los proyectos de RER más duraderos son los liderados por las propias comunidades locales, y no los que las incorporan tardíamente como beneficiarias de un diseño técnico ya cerrado.

8.7.2. Perspectivas futuras

Marcos legales vinculantes que exijan una auditoría de Etnopaisajes -análoga a un estudio de impacto ambiental, pero centrada en la memoria biocultural y las estructuras de gobernanza comunitaria- como requisito previo a cualquier proyecto forestal de gran escala en el Geoparque Imbabura.

8.7.3. Transición

Todos los conceptos vertidos en los 8 capítulos anteriores deben cristalizarse en herramientas comprobables. El capítulo final presenta las hipótesis falsables.

8.8. Aparato pedagógico

8.8.1. Preguntas de metacognición

¿De qué manera la exclusión estricta humana de un área protegida puede destruir un etnopaisaje andino?

8.8.2. Reto práctico

Entreviste a un comunero mayor sobre los indicadores naturales para predecir lluvia, y tradúzcalos a lenguaje de “sensores biológicos”.

8.9. Referencias bibliográficas

Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2000). Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological Applications*, 10(5), 1251–1262. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1251:ROTEKA]2.0.CO;2

Carvajal-Benavides, J. G., Cifuentes-Vásquez, J. K., Villalba-Flores, E. A., Cadena-Cunguan, B. A., Corrales-Pinyui, V. A., & Bastidas-Plaza, E. M. (2025). Planificación Territorial: Hacia una "Cultura Forestal Regenerativa", aplicando proyecto de Educación Ambiental PEA para la Gestión Urbana Sostenible, cantón Ibarra-Ecuador. *Innova Science Journal, 3*(4), 486-500. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n4/153

Escobar, A. (2008). Territories of difference: Place, movements, life, redes. *Duke University Press.*

Hohenthal, J., & Veintie, T. (2024). Fostering Indigenous young people's socio-environmental consciousness through place-based learning in Ecuadorian Amazonia. *Globalizations*, 21(2), 349–369. https://doi.org/10.1080/14747731.2022.2038831

López Arévalo, G. T., & Morquecho Salto, J. C. (2025). Minka e identidad colectiva: Contraste con los clusters de la teoría occidental y sus limitaciones. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(1), 3204–3215. https://doi.org/10.56712/latam.v6i1.3567

Martin, A., Dawson, N., Rodríguez, I., Bose, R., & Cotton, I. (2026). Towards just and transformative social–ecological restoration. *Nature Sustainability,* 9(3), 353–359. https://doi.org/10.1038/s41893-025-01702-w

Osborne, T., Brock, S., Chazdon, R., Chomba, S., Garen, E., Gutierrez, V., Lave, R., Lefevre, M., & Sundberg, J. (2021). The political ecology playbook for ecosystem restoration: Principles for effective, equitable, and transformative landscapes. *Global Environmental Change*, 70, Article 102320. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102320

Ostrom, E. (1990). Governing the commons: The evolution of institutions for collective action. *Cambridge University Press.*

Robinson, J. M., Gellie, N., MacCarthy, D., Mills, J. G., O'Donnell, K., & Redvers, N. (2021). Traditional ecological knowledge in restoration ecology: A call to listen deeply, to engage with, and respect Indigenous voices. *Restoration Ecology*, 29(4), Article e13381. https://doi.org/10.1111/rec.13381

Soja, E. W. (2010). Seeking spatial justice. *University of Minnesota Press*. https://doi.org/10.5749/minnesota/9780816666676.001.0001

UNESCO, Centro del Patrimonio Mundial. (1972/2023). Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, *Cultural y Natural y Directrices* Prácticas para su aplicación (categoría de paisajes culturales incorporada en 1992, párr. 39). https://whc.unesco.org/en/culturallandscape/

West, P., Igoe, J., & Brockington, D. (2006). Parks and peoples: The social impact of protected areas. *Annual Review of Anthropology,* 35, 251–277. https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.35.081705.123308

Capítulo 9: Hipótesis falsables y tableros de control para el bosque seco andino

Hipótesis falsables y tableros de control para el bosque seco andino

Figura 9.

Hipótesis falsables



9.1. Encabezado científico

9.1.1. Resumen / Abstract

Como corolario del marco teórico desarrollado en los ocho capítulos precedentes, este capítulo traduce la biocibernética regenerativa a la práctica científica y administrativa del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura. Se formulan tres hipótesis falsables (Popper, 1959) aplicables al corredor Ambuquí-Salinas-Mira, cada una acompañada de un criterio explícito de rechazo y una respuesta de manejo pre-comprometida. A partir de ellas se diseña un Tablero de Control multiescalar (micro, meso y macro) que opera como sistema nervioso del territorio, en el sentido cibernético propuesto por Beer (1972): un conjunto de

señales que solo cuentan como control cuando están atadas a un umbral de decisión y a un actuador. El capítulo integra variables ecológicas, económicas e institucionales, evalúa la viabilidad de biorrefinerías modulares incipientes (Solarte-Toro & Cardona Alzate, 2023) y la conectividad de etnopaisajes, y cierra la obra proponiendo al Geoparque Imbabura como laboratorio vivo replicable de biocibernética regenerativa para Sudamérica.

Palabras Clave / Keywords

Tableros de Control, Hipótesis Falsables, Monitoreo Adaptativo, Bosque Seco Andino, Imbabura.

9.2. Apertura pedagógica

9.2.1. Resultados de aprendizaje

1. Construir un tablero de control biocibernético con indicadores claros, umbralizados y accionables en distintas escalas de gobernanza territorial.
2. Formular hipótesis científicas falsables -con criterio explícito de rechazo- para proyectos de restauración y bioeconomía en el corredor Ambuquí-Salinas-Mira.

9.2.2. Epígrafe

“Veritas numquam perit” (La verdad nunca perece) - El rigor científico y el monitoreo objetivo de los datos son la única vía para validar la regeneración territorial.

9.3. Introducción y contextualización

9.3.1. Planteamiento del problema

Es habitual que los proyectos de conservación en Los Andes se sustenten en marcos lógicos impecables en el papel -árboles de problemas, indicadores de proceso, matrices de planificación- pero desprovistos de mecanismos que disparen una acción correctiva cuando la realidad de campo se aparta de lo previsto. Cuando un indicador no está ligado a un umbral de decisión ni a un responsable de la respuesta, deja de ser una señal de control y se convierte en un dato decorativo: se documenta el fracaso, pero nadie está obligado a actuar

sobre él. Esta ausencia de mecanismos de disparo automático es, en términos biocibernéticos, la falta de un bucle de retroalimentación cerrado, y explica por qué experiencias de reforestación técnicamente correctas han fracasado silenciosamente en el bosque seco andino sin que el sistema de gestión lo advirtiera a tiempo.

9.3.2. Estado del arte

El diseño de tableros de control (dashboards) para sistemas complejos socioecológicos se nutre de al menos tres corrientes convergentes. La primera es la literatura sobre interfaces ciencia-política, que muestra que la información solo influye en la gestión cuando es simultáneamente creíble, saliente y legítima para quienes deciden (Cash et al., 2003). La segunda es la teoría de la resiliencia y los umbrales críticos, que aporta el fundamento matemático para distinguir una fluctuación normal de una transición de régimen que exige intervención (Walker et al., 2004; Scheffer et al., 2009). La tercera es el marco general para sistemas socioecológicos de Ostrom (2009), que exige especificar no solo el recurso y el usuario, sino también el arreglo de gobernanza que procesa la información y decide la respuesta. La síntesis de estas tres corrientes es precisamente lo que un tablero de control biocibernético territorial debe operacionalizar.

9.4. Desarrollo teórico-técnico

9.4.1. Definición de hipótesis falsables en el contexto del geoparque

Popper (1959) estableció que lo que distingue a una proposición científica de un dogma no es la posibilidad de confirmarla, sino la posibilidad de refutarla: una hipótesis es científica únicamente si existe, al menos en principio, una observación que la desmentiría. Trasladado a la gestión territorial, esto implica un cambio radical respecto a la retórica habitual de la conservación, en la que casi cualquier resultado -incluso el fracaso- puede reinterpretarse como “un paso más en el proceso”. Evju et al. (2020), al revisar sistemáticamente 104 estudios de evaluación de restauración, encontraron que la falta de estandarización de indicadores y de criterios explícitos de éxito es uno de los mayores obstáculos para comparar y aprender de los proyectos de restauración “sobre el terreno”.

Una hipótesis falsable en el Geoparque Imbabura, por lo tanto, no puede formularse como “la restauración mejorará la resiliencia del territorio” -proposición vaga e irrefutable-, sino como una afirmación que especifica: (a) la variable de estado observable; (b) la dirección y magnitud del cambio esperado bajo una intervención definida; (c) un umbral cuantitativo y un plazo tales que, si no se alcanzan, la hipótesis se declara refutada; y (d) la respuesta de manejo que se activa automáticamente ante ese resultado.

Esta cuarta condición es la que conecta la falsabilidad popperiana con la biocibernética: en el lenguaje del Modelo de Sistema Viable (Beer, 1972), una hipótesis sin actuador asociado no es una señal de control, sino mero “ruido informativo” que circula por el sistema sin producir homeostasis. Por ello, cada hipótesis falsable propuesta en este capítulo se acompaña de su umbral de rechazo y de la acción concreta que se compromete a ejecutar el Comité de Gestión del Geoparque en caso de que dicho umbral se cruce, evitando así el vicio identificado en el planteamiento del problema: indicadores sin consecuencia.

9.4.2. Diseño del tablero de control multiescalar integrado (Ecológico, económico, táctico)

Un tablero de control biocibernético territorial es, en esencia, la traducción operativa del Modelo de Sistema Viable (Beer, 1972) a la escala del paisaje: cada nivel de recursión -parcela, corredor, Geoparque- requiere su propio canal de retroalimentación, capaz de absorber la variedad de perturbaciones que le corresponde sin saturar a los niveles superiores. Diseñarlo exige, siguiendo a Cash et al. (2003), que cada indicador cumpla simultáneamente tres condiciones: ser creíble desde el punto de vista técnico, ser oportuno y comprensible para quien decide (saliencia), y ser percibido como legítimo por las comunidades del corredor Ambuquí-Salinas-Mira; un indicador técnicamente impecable pero ilegible para la Junta Parroquial de Salinas no cumple ninguna función de control real.

La arquitectura propuesta distingue tres escalas anidadas -micro, meso y macro-, siguiendo la lógica panárquica de ciclos adaptativos entrelazados (Gunderson & Holling, 2002): las perturbaciones rápidas de la parcela (Escala Micro) deben

resolverse sin necesidad de escalar al Comité de Gestión, mientras que solo las señales persistentes o de gran magnitud deben activar la revisión táctica y estratégica del Geoparque (Escala Macro). Los umbrales no son arbitrarios: se apoyan, cuando es posible, en los indicadores de alerta temprana derivados de la teoría de transiciones críticas -aumento sostenido de la varianza o de la autocorrelación de una variable de estado como señal de pérdida de resiliencia antes del colapso (Scheffer et al., 2009)-, y en los cuatro componentes de la resiliencia socioecológica -latitud, resistencia, precariedad y panarquía- propuestos por Walker et al. (2004).

La Tabla 1 resume la propuesta de tablero para el corredor Ambuquí-Salinas-Mira.

Tabla1.

Tablero de control biocibernético multiescalar - Corredor ambuquí-salinas-mira

Escala	Dimensión	Variable de estado	Indicador	Umbral de decisión / Señal de alerta	Respuesta adaptativa (Actuador VSM)
Micro (parcela / rodal)	Ecológica	Supervivencia de plántulas establecidas	% de mortalidad de individuos plantados a los 12 meses	Mortalidad > 20 %	Ajuste inmediato de manejo silvicultural: riego, cambio de especie, densidad de siembra (Sistema 1 – VSM)
Meso (corredor / paisaje)	Ecológica	Conectividad funcional del corredor	Índice de conectividad estructural entre fragmentos de bosque seco	Pérdida de conectividad por debajo del umbral crítico definido en línea base	Activación de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN): corredores de restauración activa (Sistema 3 – VSM)
Meso (cadena de valor)	Económica	Viabilidad de bioemprendimientos modulares	Tasa de rentabilidad / punto de equilibrio de biorrefinerías incipientes a 24 meses	Ingresos por debajo del punto de equilibrio de forma sostenida	Reestructuración del modelo de negocio y diversificación de materia prima (Sistema 3 – VSM)
Macro (Geoparque / gobernanza)	Institucional-táctica	Congruencia operativa del Comité de Gestión	% de cumplimiento del Plan Operativo Anual (POA)	Falla operativa sostenida (incumplimiento > 2 periodos consecutivos)	Revisión táctica y realineación estratégica (Sistemas 4-5 – VSM)

💡 Foco tecnológico

Un indicador no es biocibernético si no está atado a un umbral de decisión. La utilidad de un tablero de control no reside en la cantidad de variables que despliega, sino en el número de umbrales que, al cruzarse, obligan a una acción ya pactada.

9.5. Aplicación práctica: Estudio de caso o laboratorio vivo

9.5.1. Análisis de caso real

El corredor Ambuquí-Salinas-Mira se ubica en el tramo bajo de la cuenca del río Mira, dentro del Geoparque Mundial UNESCO Imbabura, designado en abril de 2019 como el primer geoparque de Ecuador (UNESCO, 2019). El territorio corresponde al extremo septentrional de los remanentes de bosque seco tropical y matorral seco montano de los valles interandinos, cuya diversidad, estructura y estado de amenaza fueron caracterizados por Espinosa et al. (2012) para la región Pacífico ecuatoriana; los autores advierten que la protección efectiva de estos bosques cubre apenas una fracción mínima de su extensión remanente frente a una intensa presión antrópica, un diagnóstico que aplica directamente al valle del Chota-Mira. Evidencia reciente y específica del corredor confirma esta tendencia: Jácome-Aguirre et al. (2024), analizando imágenes Landsat de 2010 y 2018 para las parroquias de Ambuquí, Salinas, San Vicente de Pusir, Juan Montalvo y La Concepción, documentaron una pérdida de cobertura de bosque del 2,26 % y de vegetación xerofítica del 1,72 %, frente a un incremento de cultivos (3,73 %) y pastizales (1,94 %); el área con idoneidad de hábitat “muy alta” para especies indicadoras del matorral seco se redujo de 0,80 % a apenas 0,19 % de la superficie de la cuenca entre los periodos analizados. En la misma línea, Vilema-Ramos et al. (2023) reportan cambios sostenidos en la cobertura del matorral seco montano del valle del Chota entre 1990 y 2020 en Imbabura y Carchi. Sobre esta línea base empírica se diseñaron las hipótesis falsables y se evaluó, en paralelo, la viabilidad de biorrefinerías modulares incipientes orientadas a residuos agroindustriales de la zona (caña, frutales de valle cálido), siguiendo el enfoque multi-materia-prima que Solarte-Toro y Cardona Alzate (2023) señalan como el más adecuado para impulsar bioeconomías rurales de pequeña escala, así como la conectividad de los etnopaisajes ganaderos y agrícolas que sostienen a las comunidades afrodescendientes e indígenas del corredor.

9.5.2. Resultados y discusión

La Tabla 2 presenta las tres hipótesis falsables derivadas del diagnóstico anterior, organizadas por escala y con su respectivo criterio de rechazo. Nótese

que cada hipótesis nula (H0) fue construida deliberadamente para ser desmentible con datos ya disponibles o fácilmente colectables en el corto plazo, evitando el problema señalado por Evju et al. (2020) de indicadores que nunca llegan a evaluarse por falta de un diseño de monitoreo operativo. La discusión de campo, siguiendo la lógica de escalamiento panárquico (Gunderson & Holling, 2002), mostró tres patrones recurrentes: en la Escala Micro, la mortalidad de plántulas superior al 20 % dispara de inmediato un ajuste de manejo silvicultural sin necesidad de involucrar a instancias superiores del Comité de Gestión -ejemplo de una respuesta de Sistema 1 en términos de Beer (1972)-; en la Escala Meso, la persistencia de la pérdida de conectividad documentada por Jácome-Aguirre et al. (2024) obliga a activar corredores de restauración mediante Soluciones basadas en la Naturaleza, decisión que sí requiere coordinación entre parroquias (Sistema 3); y en la Escala Macro, el incumplimiento sostenido del Plan Operativo Anual del Geoparque -más que cualquier variable ecológica aislada- es la señal más confiable de que el problema no es técnico sino de gobernanza, y exige una revisión táctica y estratégica (Sistemas 4-5).

Tabla 2.

Hipótesis falsables para el corredor Ambuquí-Salinas-Mira

Escala	Hipótesis nula (H0) - criterio de falsación	Variable / Indicador operativo	Consecuencia si H0 no es rechazada (respuesta pre-comprometida)
H1 Micro	La reforestación activa con especies nativas del bosque seco no incrementa la tasa de supervivencia de plántulas respecto a la regeneración natural pasiva, dentro de un margen de ±10 % a los 12 meses.	% supervivencia (activa vs. pasiva); Índice de Shannon de diversidad leñosa (cf. composición reportada por Espinosa et al., 2012, para el bosque seco piemontano)	Se suspende la inversión en plantación activa en el sitio piloto y se reasignan recursos a cercado y regeneración natural asistida.
H2 Meso	La implementación de corredores de restauración (SbN) entre los remanentes de matorral seco del valle del Chota no revierte la tendencia de pérdida de cobertura y de idoneidad de hábitat documentada entre 1990-2020 y 2010-2020 (Jácome-Aguirre et al., 2024; Vilema-Ramos et al., 2023).	Índice de conectividad estructural; % de área con idoneidad de hábitat muy alta	Se reformula el diseño espacial del corredor (ancho, ubicación de nodos) y se activa mediación con juntas parroquiales de Ambuquí y Salinas.
H3 Macro	Los bioemprendimientos de biorrefinería modular no generan un excedente económico superior al de las actividades productivas convencionales de la zona (monocultivo, ganadería extensiva) en un horizonte de 24 meses.	Margen operativo neto; empleo local generado por unidad de biomasa procesada	Se reorienta el portafolio de productos de la biorrefinería (multi-materia-prima) siguiendo criterios técnico-económicos de Solarte-Toro y Cardona Alzate (2023).

9.6. Cierre analítico

9.6.1. Conclusiones

La Restauración Ecológica Regenerativa (RER) es, por diseño, un proceso iterativo, vivo e infinito: no existe un estado final de “restauración completa” que cierre el bucle de retroalimentación, sino una sucesión de hipótesis puestas a prueba, refutadas o corroboradas provisionalmente, y ajustadas. Esta obra no pretende entregar un dogma de manejo territorial, sino un manual operativo -un conjunto de umbrales, actuadores y responsabilidades- que cualquier equipo de gestión del Geoparque Imbabura, o de un territorio análogo del bosque seco andino, pueda adoptar, criticar y refutar con sus propios datos. El valor del Tablero de Control no reside en su infalibilidad, sino en su honestidad: al declarar de antemano qué observación lo desmentiría, obliga a la gestión territorial a comportarse como ciencia y no como ideología conservacionista.

9.6.2. Perspectivas futuras

El Geoparque Mundial UNESCO Imbabura, como primer geoparque de Ecuador y uno de los pocos en Sudamérica con una base territorial explícitamente biocibernética (UNESCO, 2019), está en condiciones de posicionarse como el principal “Laboratorio Vivo” de biocibernética regenerativa y bioeconomía escalable de la región. Ello exigirá, entre otras tareas, someter periódicamente a revalidación no solo el estatus geológico y cultural del geoparque, sino también el propio Tablero de Control aquí propuesto, incorporando series temporales más largas de teledetección -en la línea de Jácome-Aguirre et al. (2024) y Vilema-Ramos et al. (2023)- y ampliando el portafolio de biorrefinerías modulares hacia nuevas cadenas de materia prima, conforme a los criterios de sostenibilidad técnico-económica revisados por Solarte-Toro y Cardona Alzate (2023).

9.6.3. Transición (Cierre de la Obra)

El bosque nos enseña que el final de un ciclo es solo el sustrato orgánico del siguiente; la restauración biocibernética comienza en las manos de quien asume la gobernanza de su territorio.

9.7. Aparato pedagógico

9.7.1. Preguntas de metacognición

Si el tablero muestra éxito ecológico (aumento de cobertura) pero fracaso social (emigración), ¿es el proyecto un éxito biocibernético? ¿Qué umbral del Tablero de Control estaría fallando en capturar esa contradicción, y en qué Sistema del Modelo de Sistema Viable debería resolverse?

9.7.2. Reto práctico

Plantee una hipótesis falsable, con su umbral explícito de rechazo y su respuesta de manejo pre-comprometida, para evaluar el impacto de las biorrefinerías modulares sobre la equidad económica local en Imbabura, siguiendo el formato de la Tabla 9.2 de este capítulo.

9.8. Referencias bibliográficas

Beer, S. (1972). Brain of the firm. Allen Lane, *The Penguin Press.*

Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., Jäger, J., & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8086–8091. https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100

Espinosa, C. I., de la Cruz, M., Luzuriaga, A. L., & Escudero, A. (2012). Bosques tropicales secos de la región Pacífico Ecuatorial: diversidad, estructura, funcionamiento e implicaciones para la conservación. *Ecosistemas,* 21(1–2), 167–179.

Evju, M., Hagen, D., Kyrkjeeide, M. O., & Köhler, B. (2020). Learning from scientific literature: ¿Can indicators for measuring success be standardized in “on the ground” restoration? *Restoration Ecology*, 28(3), 519–531. https://doi.org/10.1111/rec.13149

Gunderson, L. H., & Holling, C. S. (Eds.). (2002). Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems. *Island Press.*

Jácome-Aguirre, G., Farinango-Guatemal, D., León-Espinoza, M., & Rosales-Enríquez, O. (2024). Efectos del cambio de cobertura vegetal en la

distribución potencial de la Mosquera (Croton wagneri Müll. arg.) en la cuenca hidrográfica del río Mira, Ecuador. *Investigaciones Geográficas,* (82), 127–144. https://doi.org/10.14198/INGEO.27083

Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems*. Science,* 325(5939), 419–422. https://doi.org/10.1126/science.1172133

Popper, K. R. (1959). The logic of scientific discovery. *Hutchinson & Co*. (Trabajo original publicado en 1935).

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E. H., Rietkerk, M., & Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260), 53–59. https://doi.org/10.1038/nature08227

Solarte-Toro, J. C., & Cardona Alzate, C. A. (2023). Sustainability of biorefineries: Challenges and perspectives. *Energies,* 16(9), 3786. https://doi.org/10.3390/en16093786

UNESCO. (2019). Imbabura UNESCO Global Geopark. International *Geoscience and Geoparks Programme.* https://www.unesco.org/en/iggp/imbabura-unesco-global-geopark

Vilema-Ramos, B., León-Espinoza, M., Layana-Bajaña, E., & Rosales-Enríquez, O. (2023). Cambios en la cobertura del matorral seco montano del Valle Chota (Imbabura y Carchi, Ecuador) entre 1990 y 2020*. Revista Peruana de Biología*, 30(4), e24672. https://doi.org/10.15381/rpb.v30i4.24672

Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2), 5. https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205

HACIA UNA BIOCIBERNÉTICA REGENERATIVA

Sistemas Socioecológicos, Desarrollo Regenerativo y Restauración de Territorios Vivos

PARTE II · 12 ESPECIES FORESTALES PARA LA RESTAURACIÓN BIOCIBERNÉTICA



"La evaluación integral y el análisis multiescala de las características anatómicas, dendrológicas y tecnológicas de las especies forestales comerciales resulta esencial para la toma de decisiones informadas. Este enfoque pone en evidencia hallazgos clave con repercusiones relevantes en los ámbitos de la taxonomía, la conservación y el desarrollo de biotecnologías aplicadas a materiales, promoviendo el uso responsable de maderas poco aprovechadas, ofreciendo herramientas confiables para el control forestal y respaldando estrategias de silvicultura basadas en evidencia científica." (Carvajal-Benavides et al., 2025).

Capítulo 1: *Schinus molle L.:* Dendrología, Propagación, Fitoquímica y Restauración Regenerativa en el Geoparque Imbabura.

Schinus molle L. (Molle)

Figura 10.

Dendrología, propagación, fitoquímica y restauración regenerativa



1.1. Encabezado Científico

1.1.1 Resumen / Abstract

El capítulo examina a Schinus molle L. desde una perspectiva dendrológica, silvicultural y bioeconómica para valorar su uso potencial en restauración regenerativa. La anatomía de su madera y su respuesta germinativa están documentadas en estudios específicos, mientras que ensayos en relaves cupríferos muestran potencial de fitoextracción o fitoestabilización para determinados metales bajo condiciones experimentales. Su aceite esencial presenta un repertorio variable de monoterpenos y un potencial biopesticida

prometedor, aunque la revisión reciente subraya que todavía se requiere avanzar desde ensayos preliminares hacia validaciones de campo y formulaciones comerciales. La aplicación al Geoparque Imbabura se plantea, por tanto, como una hipótesis de manejo que debe calibrarse con procedencias locales, monitoreo edáfico y evaluación de riesgos antes de escalarse (Pereira et al., 2016; Olvera-Licona et al., 2021; Lam et al., 2017; Scalvenzi et al., 2024).

Palabras Clave / Keywords

Schinus molle, Dendrología, Germinación, Fitorremediación experimental, Aceite esencial, Restauración, Geoparque Imbabura.

1.2. Apertura Pedagógica

1.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Analizar la anatomía de la madera y la evidencia ecofisiológica disponible de Schinus molle, diferenciando rasgos medidos de inferencias sobre tolerancia ambiental.

Diseñar protocolos de propagación y ensayos de establecimiento de Schinus molle en arreglos de restauración, incluyendo controles que permitan evaluar si actúa como especie facilitadora.

Estructurar cadenas de bioeconomía circular escalables basadas en la extracción de aceites esenciales y PFNM de la especie.

1.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino

"Amor fati" - Amar el destino del territorio árido, no como una condena a la desertificación, sino como el lienzo preciso donde la vida demuestra su mayor genialidad cibernética para regenerarse.

1.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

1.3.1. Ecofisiología y respuesta al estrés

La tolerancia de S. molle a condiciones ambientales severas no debe extrapolarse sin contexto. En un estudio de relaves de cobre del norte de Chile, la especie mostró factores de translocación compatibles con potencial de

fitoextracción para Cu, Mn, Pb y Zn bajo tratamientos específicos; este resultado respalda su interés para fitorremediación, pero no autoriza a asumir idéntico comportamiento frente a todos los metales ni en cualquier suelo. En restauración del Geoparque, cualquier uso con ese propósito debe acompañarse de análisis de tejido vegetal, suelo y riesgo de transferencia a productos cosechables (Lam et al., 2017).

1.3.2. Anatomía de la madera y xilema

La caracterización xilológica de Schinus molle documenta propiedades físicas y rasgos anatómicos de la madera en material de plantación. Esta evidencia permite describir porosidad, dimensiones de elementos vasculares y densidad, pero no convierte por sí sola esos rasgos en una demostración directa de resistencia a cavitación o de durabilidad frente a xilófagos. En el Geoparque, la relación entre anatomía y desempeño hídrico debe validarse con mediciones funcionales (Olvera-Licona et al., 2021).

1.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal

1.4.1. Biología de semillas y germinación

Pereira et al. (2016) relacionaron anatomía de la semilla, dormancia y tratamientos de alivio de dormancia en Schinus molle. El manejo pregerminativo debe reproducir tratamientos ensayados y registrar procedencia, viabilidad, temperatura y respuesta germinativa; no debe extrapolarse un único tratamiento químico como protocolo obligatorio para todos los lotes (Pereira et al., 2016).

1.4.2. Manejo en vivero forestal e inoculación simbiótica

La evidencia seleccionada para este capítulo permite fundamentar el manejo pregerminativo de las semillas, pero no respalda un protocolo micorrícico obligatorio ni una tasa universal de crecimiento en vivero. Para Imbabura se recomienda comparar sustratos, riego, procedencias y, si se ensayan inoculantes, incluir controles no inoculados y caracterización microbiológica (Pereira et al., 2016).

1.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

1.5.1. Especie Nodriza y Sucesión Facilitada

En los ecosistemas desertificados de Ambuquí y el Valle del Chota, el molle asume el papel de "planta nodriza" (nurse plant syndrome). Su rápido anclaje y densa copa aparasolada abaten la temperatura letal del sustrato desnudo, creando una "isla de fertilidad" sombreada donde la hojarasca retiene la humedad. Bajo esta micro-biósfera amparadora germinan las semillas ornitocóricas de especies clímax sucesionales tardías.

1.5.2. Hidrología Forestal y Dinámica de Control de Erosión

Como bioingeniería geológica aplicada al Geoparque Imbabura, las plantaciones de molle (dispuestas a tresbolillo) operan como un sistema de retención biomecánica profunda en fallas activas y laderas amenazadas por remoción en masa, como las colindantes al Deslizamiento de Aloburo. Su raíz pivotante ancla los planos de falla al subsuelo firme, mientras la intrincada malla radicular lateral previene el lavado laminar o aluviones estacionales.

1.5.3. Sistemas Integradores Agroforestales

Dentro del ordenamiento silvopastoril andino, S. molle se planta en densas alineaciones geométricas constituyendo cercas vivas y formidables barreras rompevientos que frenan la desecación por el efecto foehn. Un factor biocibernético protector de este arreglo es que las altas concentraciones de aceites esenciales resinosos en sus hojas las tornan inapetentes e intolerables para el ganado vacuno y caprino, asegurando el desarrollo vigoroso del árbol sin daño por ramoneo, a la par que provee sombra indispensable para el rebaño.

1.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

Tabla 3.

Tabla de síntesis · Evidencia verificable y aplicaciones potenciales

Componente / evidencia	Hallazgo respaldado	Aplicación o implicación
Semillas y germinación	La anatomía de la semilla y la dormancia condicionan la germinación; los tratamientos pregerminativos deben seleccionarse según evidencia experimental. (Pereira et al., 2016)	Diseño de protocolos de vivero con trazabilidad de procedencia y comparación de tratamientos.
Madera y xilema	La xilotecnia de S. molle documenta rasgos anatómicos y propiedades físicas útiles para interpretar su desempeño estructural. (Olvera-Licona et al., 2021)	Selección silvicultural y evaluación de desempeño en ambientes secos, sin extrapolar propiedades no medidas localmente.
Fitorremediación	En relaves cupríferos del norte de Chile se documentó potencial para acumulación y translocación de determinados metales bajo condiciones experimentales. (Lam et al., 2017)	Aplicación solo con análisis previo de suelo, tejido vegetal y riesgo de transferencia a productos cosechables.
Aceite esencial	La revisión sistemática disponible confirma composición terpénica variable y potencial biopesticida, aunque destaca la necesidad de validación de campo. (Scalvenzi et al., 2024)	Desarrollo de formulaciones piloto y ensayos de eficacia y seguridad antes de escalar a un bioemprendimiento.

1.6.1. Bioemprendimientos biobasados y farmacopea

La validación farmacognóstica del molle certifica la extraordinaria actividad biológica de sus aceites esenciales In vitro, concentraciones puras y diluidas inhiben agresivamente a la bacteria Porphyromonas gingivalis (causante de periodontitis) y a la levadura patógena Candida albicans, así como a hongos fitopatógenos del género Colletotrichum spp. El refinamiento de estos bioproductos permite consolidar biorrefinerías modulares comunitarias en Imbabura orientadas a los mercados de nutracéutica y biocosmética.

1.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

1.7.1. Usos Culturales e Identidad Afroandina

El árbol de molle ostenta un estatus sagrado en los Andes; durante el incario fue venerado como el "Árbol de la Vida", siendo sus resinas fundamentales para los rituales de embalsamamiento y momificación de la élite. En la actualidad, su presencia define el paisaje cultural de las comunidades afroecuatorianas del Valle del Chota (Salinas, Juncal, Carpuela, Ambuquí). Bajo las frescas bóvedas

aparasoladas de estos árboles centenarios, las comunidades han perpetuado los espacios de encuentro y el nacimiento de la música y danza afroandina conocida como la Bomba del Chota.

1.7.2. Usos Medicinales y Textiles

La etnomedicina andina no desperdicia ninguna fracción del molle. Sus hojas maceradas actúan como potentes repelentes antimosquitos y sanalotodo articular; su resina se utiliza empíricamente como obturador de caries y parche cicatrizante; y las infusiones de los frutos se prescriben sistemáticamente contra edemas y "males de orina" Simultáneamente, en las tradiciones artesanales indígenas de Otavalo y Cotacachi, la ebullición ecológica de sus ramas tiernas y hojas genera tintes naturales indelebles de color amarillo y verde oliva, esenciales para la pigmentación textil de los ponchos y artesanías de la región.

1.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

1.8.1. Conclusiones biocibernéticas

Schinus molle combina rasgos de rusticidad, una anatomía de madera compatible con ambientes secos, respuestas germinativas manejables y metabolitos secundarios de interés. La literatura respalda su estudio como especie multipropósito, pero la función de “infraestructura biológica” en Imbabura debe demostrarse mediante ensayos locales y no asumirse a partir de evidencias de otras regiones. Su mayor valor para un enfoque biocibernético es precisamente permitir un manejo adaptativo: medir establecimiento, supervivencia, respuesta hídrica y calidad de los productos antes de ampliar la intervención (Pereira et al., 2016; Olvera-Licona et al., 2021; Scalvenzi et al., 2024).

¿Qué variables mediría para determinar si la hojarasca de Schinus molle facilita o inhibe el establecimiento de otras especies en un arreglo de restauración?

Considerando que S. molle ha mostrado acumulación y translocación de determinados metales en relaves mineros, ¿qué controles de suelo y tejido serían necesarios antes de comercializar frutos procedentes de un sitio de fitorremediación?

¿Qué evidencia etnobotánica y qué mecanismos de consentimiento y distribución de beneficios deberían existir antes de incorporar conocimientos locales sobre S. molle a una cadena comercial?

Diseño Silvicultural: proponga un ensayo de lindero vivo con Schinus molle que compare al menos dos espaciamientos y dos tratamientos pregerminativos. Defina variables de supervivencia, crecimiento, daño por herbivoría y estabilidad del suelo, y establezca criterios para decidir si el arreglo debe escalarse.

1.9. Referencias Bibliográficas

Carvajal-Benavides, J. G., Paredes-Rodríguez, H. O., Quinatoa-Ulcuango, J. K., Villagran-Castañeda, J. E., Farinango-Coyago, M. C., & Tituaña-Maigua, L. S. (2025). Análisis comparativo de atributos dendrológicos y tecnológicos de cinco especies forestales nativas... *Innova Science Journal, 3*(3), 72-96. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/70

Carvajal-Benavides, J. G., Paredes-Rodríguez, H. O., Villalba-Flores, E. A., Cifuentes-Vásquez, J. K., Alemán-Chamorro, Y. E., & Colimba, J. J. (2025). Evaluación Xilológica Multiescala de cinco Especies Forestales Comerciales del Ecuador... *Innova Science Journal, 3*(3), 46-71. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/69

Pereira, M. P., Corrêa, F. F., Polo, M., de Castro, E. M., Cardoso, A. Á., & Pereira, F. J. (2016). Seed germination of Schinus molle L. (Anacardiaceae) as related to its anatomy and dormancy alleviation. *Seed Science Research*, 26(4), 351–361. https://doi.org/10.1017/S0960258516000167

Olvera-Licona, G., Machuca, R., Borja, A., Corona, A., Zaragoza, I., Arreola, J. G., & Jiménez, J. (2021). Xilotecnia de la madera de Schinus molle L. de una plantación forestal comercial en Hidalgo*, México. Madera y Bosques*, 27(1), e2711567. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2711567

Lam, E. J., Cánovas, M., Gálvez, M. E., Montofré, I. L., Keith, B. F., & Faz, A. (2017). Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 210–217. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.015

Scalvenzi, L., Durofil, A., Cáceres Claros, C., Pérez Martínez, A., Guardado Yordi, E., Manfredini, S., Baldini, E., Vertuani, S., & Radice, M. (2024). Unleashing Nature's Pesticide: A Systematic Review of Schinus molle Essential Oil's Biopesticidal Potential. *Sustainability,* 16(23), 10444. https://doi.org/10.3390/su162310444

Capítulo 2: *Tara spinosa* (Molina) *Britton & Rose* (sin. *Caesalpinia spinosa*) (Guarango / Tara).

Tara spinosa (Molina*) Britton & Rose* (sin. *Caesalpinia spinosa*) (Guarango / Tara)

Figura 11.

Dendrología, biorrefinerías de taninos y agroforestería regenerativa



2.1. Encabezado Científico

2.1.1. Resumen / Abstract

Este capítulo analiza Tara spinosa (Molina) Britton & Rose -nombre aceptado en POWO; Caesalpinia spinosa es sinónimo- como especie andina de alto valor silvicultural y bioeconómico. La evidencia disponible sustenta la importancia de la altitud y de las condiciones edafoclimáticas sobre la producción de vainas, taninos y goma, así como el valor industrial de esos coproductos. Un aspecto fundamental es distinguirla de las leguminosas nodulantes: Cordero et al. (2016) la describieron como una leguminosa arbórea no nodulante en el experimento

comparativo con Vachellia macracantha. Por ello, la restauración con tara no debe justificarse por una supuesta fijación biológica directa de N2, sino por su producción de PFNM, su manejo agroforestal y las asociaciones micorrícicas que sí han sido estudiadas (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Murga-Orrillo et al., 2023; Villena Velásquez & Seminario, 2021; Sangay et al., 2017; Cordero et al., 2016).

Palabras Clave / Keywords

Caesalpinia spinosa, Galactomananos, Biorrefinerías, Dinámica de Nutrientes, Geoparque Imbabura, Bioeconomía.

2.2. Apertura Pedagógica

2.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Explicar por qué Tara spinosa debe tratarse como leguminosa no nodulante en la evidencia revisada y cómo las micorrizas y el manejo agroforestal pueden contribuir a la dinámica de nutrientes.

Diseñar protocolos de propagación silvicultural eficientes para superar la latencia física de la semilla mediante abrasión mecánica.

Estructurar conceptualmente una biorrefinería de "Cero Residuos" a partir de la segregación anatómica de los polifenoles (valvas) y polisacáridos (endospermo) del fruto del guarango.

2.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino

“Ranti ranti” (dar y recibir) - La reciprocidad ecológica se demuestra midiendo intercambios de materia, energía y beneficios, no atribuyendo a una especie procesos que no han sido comprobados.

2.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

2.3.1. Fisiología y fenología de la especie

El guarango produce racimos terminales de flores zigomorfas y hermafroditas de tonos amarillo-rojizos. En plantaciones manejadas, inicia su etapa reproductiva a partir del tercer año, presentando un patrón bianual de floración (octubre-noviembre y abril-mayo) y fructificación (enero-febrero y julio-agosto) (Murga-Orrillo et al., 2023).

2.3.2. Ecofisiología y Respuesta al Estrés

La producción de tara varía con la altitud, la temperatura y la fertilidad del suelo. En un gradiente andino peruano, la respuesta productiva de vainas, valvas, semillas y goma cambió entre ambientes naturales y agroforestales; la literatura también documenta un alargamiento del ciclo reproductivo a mayor altitud. Estos resultados justifican zonificar el manejo por ambiente, pero no permiten atribuir automáticamente cada cambio a una única vía metabólica o afirmar incrementos “exponenciales” de taninos sin medición específica (Murga-Orrillo et al., 2023).

2.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal

2.4.1. Inoculación Simbiótica

La tara no debe describirse como una especie que forma nódulos fijadores de nitrógeno con Rhizobium. En el estudio comparativo de Cordero et al. (2016), C. spinosa fue tratada explícitamente como leguminosa arbórea no nodulante. Sí existe evidencia de que la simbiosis micorrícica arbuscular puede favorecer su crecimiento temprano, por lo que los viveros pueden evaluar inoculantes micorrícicos locales con controles experimentales y trazabilidad del sustrato (Cordero et al., 2016; Sangay et al., 2017).

2.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

2.5.1. Tipos de silvicultura restaurativa

El guarango puede incorporarse a arreglos agroforestales y de restauración por su copa, producción de hojarasca y valor no maderable. La fijación directa de N2 no está sustentada para la especie y, por tanto, no debe emplearse como

explicación de su posible efecto restaurativo. Su posible efecto facilitador sobre micrositios degradados debe evaluarse mediante variables de sombra, humedad, materia orgánica, supervivencia de plántulas acompañantes y respuesta del suelo (Murga-Orrillo et al., 2023).

2.5.2. Hidrología forestal y suelos

La restauración con tara debe valorar cambios reales en infiltración, cobertura, estabilidad superficial y materia orgánica mediante parcelas comparables. No deben generalizarse valores puntuales de densidad aparente o pH como efectos universales de la especie sin evidencia experimental específica. El enfoque recomendado es medir línea base, tratamiento y control antes de atribuir mejoras edáficas a C. spinosa.

2.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y Bioeconomía Escalable

2.6.1. Fitoquímica y bioactivos

La tara ofrece dos corrientes de biomasa bien documentadas para valorización: las vainas, ricas en polifenoles y galotaninos, y el endospermo de la semilla, del que se obtiene una goma constituida principalmente por galactomanano. Chambi et al. (2013) estudiaron el potencial antioxidante de extractos polifenólicos de las vainas, mientras Ibieta et al. (2023) caracterizaron molecularmente el galactomanano de la goma de tara. Estas evidencias respaldan investigación en ingredientes y biomateriales, pero no justifican atribuir eficacia antineoplásica clínica ni porcentajes universales de rendimiento sin análisis del lote (Chambi et al., 2013; Ibieta et al., 2023).

2.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables

Una biorrefinería territorial de tara puede separar, como mínimo, una corriente de vainas para recuperación de polifenoles/taninos y una corriente de semillas para obtención de goma de galactomanano. La goma posee propiedades de espesamiento, emulsificación y estabilización de interés industrial; los extractos de vaina muestran actividad antioxidante experimental. El escalamiento debe basarse en balances de masa, calidad por procedencia, demanda real y tasas

locales de producción, no en déficits de mercado o precios no cotejados (Ibieta et al., 2023; Chambi et al., 2013).

2.6.3. Biorrefinerías de segunda generación y economía circular

El principio de “cero residuos” debe plantearse como objetivo de diseño y no como resultado supuesto. Cada fracción residual de la tara requiere caracterización fisicoquímica y evaluación de inocuidad antes de asignarle usos como fertilizante, alimento o biomaterial. La trazabilidad de la materia prima y el balance de masa son condiciones mínimas para demostrar circularidad.

2.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

2.7.1. Usos Culturales e Identidad

La coevolución de las etnias andinas con el paisaje ha consagrado a Caesalpinia spinosa como una herencia biocultural innegable. El pueblo indígena Otavalo, que administra posesiones territoriales ancestrales regidas por la convivencia con la Pachamama, ha utilizado por milenios la biomasa forestal maderable local en su cotidianidad constructiva. Igualmente, las vibrantes poblaciones afroecuatorianas del Valle del Chota han dependido secularmente del guarango como barrera viva para el ganado, sombra y fuente crítica de dendroenergía de alta densidad.

2.7.2. Usos Medicinales y Fitoterapéuticos

Antes de que la espectroscopía masiva revelara los ácidos gálicos y elatigotaninos, la medicina popular folclórica afroandina e indígena aprovechaba empíricamente las vainas cocidas del guarango como un potente agente astringente y cicatrizante tópico, aplicaciones plenamente validadas hoy por sus eficaces atributos bactericidas frente a patógenos dérmicos grampositivos.

2.7.3. Usos Alimentarios Funcionales

A través del procesamiento de la Goma de Tara, la especie se consagra como un espesante alimentario indigestible ideal que no suma carga calórica, utilizado para estabilizar alimentos sin repercusiones nocivas para la dieta humana.

2.7.4. Usos Materiales

El fuste leñoso, además de su combustión térmica prolongada y eficiente (leña/carbón), es empleado extensivamente por los campesinos para confeccionar postes estructurales de corrales y barreras físicas a través del empalamiento rústico.

2.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

2.8.1. Conclusiones biocibernéticas

El valor regenerativo de la tara se sostiene en su adaptación andina, su producción de taninos y galactomananos y su aptitud para sistemas agroforestales, no en una supuesta fijación directa de nitrógeno. La evidencia edafoclimática muestra que la productividad depende del ambiente; por ello, una biorrefinería territorial debe acoplar su demanda de biomasa a la productividad local y a prácticas silviculturales verificables. (Murga-Orrillo et al., 2023; Cordero et al., 2016)

2.8.2. Preguntas de metacognición y debate

Si la productividad de vainas, taninos y goma cambia con el gradiente edafoclimático, ¿qué variables debería medir un decisor antes de zonificar plantaciones de conservación y producción?

Si la tara no forma nódulos fijadores de nitrógeno en la evidencia revisada, ¿cómo debería diseñarse un ensayo de micorrización que permita separar el efecto del inoculante del efecto del sustrato y del riego?

2.8.3. Reto práctico profesional

Diseño de Biorrefinería Modular. Elabore un flujograma conceptual (diagrama de bloques) de una biorrefinería cooperativa rural "cero residuos" para procesar una cosecha de 1 tonelada de vainas de guarango del Valle del Chota. Especifique qué insumo final obtendrá de la valva, del endospermo y del germen de la semilla, y asigne una aplicación industrial o social a cada uno de estos tres productos.

2.9. Referencias Bibliográficas

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Tara spinosa (Molina) Britton & Rose*. Plants of the World Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/249443-2

Murga-Orrillo, H., Lobo, F. de A., Amorim, R. S. S., Dionisio, L. F. S., Nuñez Bustamante, E., Chu-Koo, F. W., Arévalo López, L. A., Arévalo-Hernández, C. O., & Abanto-Rodriguez, C. (2023). Increased Production of Tara (Caesalpinia spinosa) by Edaphoclimatic Variation in the Altitudinal *Gradient of the Peruvian Andes. Agronomy,* 13(3), 646. https://doi.org/10.3390/agronomy13030646

Villena Velásquez, J. J., & Seminario, J. F. (2021). Origen y domesticación de Tara spinosa (Leguminosae, Caesalpinioideae). *Lilloa,* 58(2), 131–159. https://doi.org/10.30550/j.lil/2021.58.2/2021.11.14

Sangay, S., Sanguin, H., Tournier, E., Thioulouse, J., Prin, Y., & Duponnois, R. (2017). Impacto de la simbiosis micorrítica arbuscular en el crecimiento temprano del cultivo de tara [Caesalpinia spinosa (Molina) Kuntze]. *Revista Forestal del Perú*, 32(2), 89–96. https://doi.org/10.21704/rfp.v32i2.1040

Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M. M., Rincón, A., & Pueyo, J. J. (2016). *Rhizobial diversity,* symbiotic effectiveness and structure of nodules of Vachellia macracantha. Soil Biology and Biochemistry, 96, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.011

Ibieta, G., Bustos, A.-S., Ortiz-Sempértegui, J., Linares-Pastén, J. A., & Peñarrieta, J. M. (2023). Molecular characterization of a galactomannan extracted from Tara (Caesalpinia spinosa) seeds. *Scientific Reports,* 13, 21893. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49149-3

Chambi, F., Chirinos, R., Pedreschi, R., Betalleluz-Pallardel, I., Debaste, F., & Campos, D. (2013). Antioxidant potential of hydrolyzed polyphenolic extracts from tara (Caesalpinia spinosa) pods. *Industrial Crops and Products*, 47, 168–175. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.03.009

Capítulo 3: *Vachellia macracantha* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) *Seigler & Ebinger*: Dendroclimatología, Germinación, Simbiosis Rizobial y Restauración del Bosque Seco.

*Vachellia macracantha (*Humb. & Bonpl. ex Willd.) *Seigler & Ebinger* (Faique / Espino)

Figura 12.

Vachellia macracantha



3.1. Encabezado Científico

3.1.1. Resumen / Abstract

Vachellia macracantha reúne tres líneas de evidencia especialmente útiles para una restauración basada en mecanismos: la dendroclimatología muestra sensibilidad de anillos y variables de vasos al clima; ensayos de germinación respaldan la escarificación física frente a varios tratamientos químicos; y estudios microbiológicos demuestran nódulos fijadores de nitrógeno con cepas de Ensifer y Rhizobium. Estas evidencias permiten formular protocolos de vivero y monitoreo para bosque seco andino, evitando trasladar al Geoparque cifras de productividad o resistencia mecánica que no hayan sido medidas localmente (Peña & Bräuning, 2026; Maldonado-Arciniegas et al., 2018; Cordero et al., 2016).

Palabras Clave / Keywords

Vachellia macracantha, Dendroclimatología, Escarificación mecánica, Nodulación, Rizobios, Bosque seco, Geoparque Imbabura.

3.2. Apertura Pedagógica

3.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Interpretar señales dendroclimáticas del faique y discutir cómo podrían informar, junto con pronósticos y monitoreo local, decisiones de establecimiento.

Evaluar críticamente los métodos pregerminativos, descartando la escarificación química en favor de la mecánica para bioseguridad en viveros comunitarios.

Diseñar alternativas de bioeconomía que comparen usos no maderables, silvopastoriles y dendroenergéticos con datos locales de biomasa y presión extractiva.

3.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino

"El espino que hiere es el mismo que da sombra" - En la restauración de paisajes áridos, las especies más rústicas y defensivas son aquellas que actúan como madres protectoras de la fragilidad del bosque que renace.

3.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

3.3.1. Ecofisiología y respuesta al estrés

Los anillos de crecimiento y las variables anatómicas de los vasos de V. macracantha muestran sensibilidad climática. Peña y Bräuning (2026) documentaron relaciones entre el ancho de anillo, variables de lumen de vasos y condiciones de humedad/precipitación, además de respuestas estacionales de la densidad de vasos frente a variables térmicas e índices de sequía. Estos datos respaldan el uso dendroclimático de la especie, pero no permiten inferir una duración universal de supervivencia a sequía extrema (Peña & Bräuning, 2026).

3.3.2. Anatomía de la madera y xilema

El estudio dendroanatómico de V. macracantha documenta variación climáticamente sensible en ancho de anillo y rasgos de vasos. La interpretación

hidráulica debe limitarse a las variables realmente medidas; por ello, no debe traducirse automáticamente cambios de densidad o área de lumen en una demostración directa de resistencia a embolia o cavitación (Peña & Bräuning, 2026).

Figura 13.

Anatomía de la madera y xilema



3.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y Reproducción Forestal

3.4.1. Biología de semillas y germinación

Las semillas de V. macracantha poseen una latencia exógena extrema. En estado natural, la germinación basal es de apenas el 6%. Los ensayos biotecnológicos demostraron que la escarificación química (ácido sulfúrico, nítrico o fosfórico) es ineficaz y no presenta diferencias estadísticas con el control, por lo que se desaconseja por su riesgo toxicológico. El protocolo óptimo y recomendado es la escarificación mecánica (limado o abrasión focalizada), la

cual multiplica la germinación elevándola al 46% con alto vigor (Maldonado-Arciniegas et al., 2018).

3.4.2. Inoculación simbiótica

Vachellia macracantha sí cuenta con evidencia directa de nodulación. Cordero et al. (2016) aislaron rizobios de nódulos radicales y los asignaron a Ensifer y Rhizobium, caracterizando además genes simbióticos y eficacia de cepas. Esto respalda evaluar inoculantes para restauración, pero la respuesta debe validarse con suelo y procedencias locales antes de convertir una cepa en recomendación general (Cordero et al., 2016).

3.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

3.5.1. Hidrología forestal y suelos

Las raíces de especies leñosas pueden contribuir al refuerzo de suelos y a la estabilización superficial, pero la resistencia mecánica depende de diámetro, arquitectura radical, suelo y humedad. No deben atribuirse a V. macracantha rangos de tracción sin una fuente primaria inequívoca. Para Imbabura se propone medir densidad y distribución de raíces, resistencia a tracción y cohesión aparente antes de convertir este rasgo en parámetro de diseño.

3.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

3.6.1. Bioemprendimientos biobasados escalables

El follaje, las vainas y la madera de V. macracantha pueden considerarse dentro de esquemas silvopastoriles y dendroenergéticos, pero la productividad debe expresarse con datos locales de biomasa y calidad nutricional. Los rendimientos deben determinarse localmente; no es apropiado asumir valores de 3–8 t ha−1 año−1 sin una fuente primaria específica para la especie y el contexto de manejo.

3.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

- Usos Culturales e Identidad: V. macracantha está profundamente arraigada en las dinámicas socioculturales y de subsistencia de las comunidades afroecuatorianas y mestizas del Valle del Chota, Ambuquí y Pablo Arenas. Posee altísimos Índices de Valor de Uso en la etnobotánica regional.
- Usos Medicinales y Fitoterapéuticos: En la medicina vernácula, los extractos de su corteza, flores y resina se prescriben empíricamente como agentes refrescantes, pectorales (contra ronquera y afecciones respiratorias) y como cataplasmas desinflamatorias.
- Usos Alimentarios Funcionales: Su abundante floración melífera la convierte en un soporte vital para polinizadores como Apis mellifera, garantizando la producción apícola rural.
- Usos Materiales: Su madera provee materia prima para herramientas agrícolas, colorantes, resinas y combustibles domésticos de alta densidad calórica.

3.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

3.8.1. Preguntas de metacognición y debate

¿Qué información social, económica y ecológica sería necesaria para evaluar políticas sobre aprovechamiento de madera o carbón de V. macracantha sin desplazar costos hacia las comunidades locales?

Si las variables de crecimiento y vasos responden a la humedad y la temperatura, ¿cómo podría un silvicultor incorporar esa evidencia -sin asumir causalidad perfecta- a la planificación de vivero y plantación?

Teniendo en cuenta la ineficacia documentada de los ácidos, ¿qué barreras logísticas de adopción comunitaria presenta la escarificación mecánica manual para la producción de plántulas a gran escala?

3.8.2. Reto Práctico profesional

Ejercicio de Dendroclimatología Aplicada. A partir de las relaciones observadas entre crecimiento, anatomía de vasos y clima, proponga un cronograma de vivero

y plantación que combine evidencia dendroclimática, pronósticos estacionales y monitoreo local, explicitando la incertidumbre de cada fuente de información.

3.9. Referencias Bibliográficas

Peña, K., & Bräuning, A. (2026). Effect of Climate on Ring-Width and Vessel Variables of Vachellia macracantha from Dry Forest in Southern Ecuador. *Tree-Ring Research*, 82(2), 89–102. https://doi.org/10.3959/TRR2025-7

Maldonado-Arciniegas, F., Ruales, C., Caviedes, M., Ramírez, D., & León-Reyes, A. (2018). An evaluation of physical and chemical scarification methods on seed germination of Vachellia macracantha. *Acta Agronomica,* 67(1), 120–125. https://doi.org/10.15446/acag.v67n1.60696

Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M. M., Rincón, A., & Pueyo, J. J. (2016). Rhizobial diversity, symbiotic effectiveness and structure of nodules of Vachellia macracantha. *Soil Biology and Biochemistry,* 96, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.011

Capítulo 4: *Tecoma stans* (L.) *Juss. ex Kunth*: Respuesta al Estrés Hídrico, Conservación de Semillas y Fitoquímica en el Geoparque Imbabura.

Tecoma stans (L.) *Juss. ex Kunth* (Cholán / Floramarillo)

Figura 14.

Respuesta al estrés hídrico, conservación de semillas y fitoquímica



4.1. Encabezado Científico

4.1.1. Resumen / Abstract

Tecoma stans se analiza aquí como especie pionera con interés para restauración y bioeconomía, sin asumir como rasgos demostrados la “fotosíntesis caulinar” ni una dependencia obligatoria de Scleroderma verrucosum, afirmaciones que carecen de respaldo específico suficiente. La evidencia verificada muestra respuestas claras del crecimiento, fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática al déficit hídrico, buena capacidad de conservación de semillas bajo condiciones controladas y una fitoquímica rica en alcaloides y compuestos fenólicos con actividad farmacológica preclínica (Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018; Alves et al., 2025; Anand & Basavaraju, 2021).

Palabras clave / Keywords

Tecoma stans, Tecomina, Peletización de Semillas, Bosque Seco, Geoparque Imbabura.

4.2. Apertura Pedagógica

4.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Diseñar ensayos comparativos de establecimiento de Tecoma stans en laderas, evaluando si técnicas de siembra directa o peletización mejoran la emergencia frente a controles.

Comprender el mecanismo de respuesta fotosintética al estrés hídrico y el ajuste estomático como respuestas ecofisiológicas de supervivencia al estrés hídrico.

Diseñar una cadena de investigación y valorización no destructiva de biomasa foliar de Tecoma stans que incorpore estandarización fitoquímica, seguridad y regulación.

4.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino

"La resiliencia se demuestra cuando un organismo ajusta su funcionamiento a la disponibilidad real de recursos" - Inspirado en el estoicismo ecológico y la asombrosa biología del cholán.

4.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

4.3.1. Dendrología y morfología

Tecoma stans es una Bignoniaceae americana ampliamente distribuida y naturalizada. Las revisiones modernas la describen como arbusto o árbol pequeño de rápido crecimiento, con hojas compuestas y flores amarillas tubulares, rasgos que explican tanto su uso ornamental como su capacidad de colonización. Su empleo en restauración debe ser prudente porque la misma plasticidad que favorece el establecimiento también puede conferir comportamiento invasor fuera de su rango y contexto de manejo (Singh et al., 2024; Anand & Basavaraju, 2021).

4.3.2. Fisiología y fenología de la especie

La revisión ecológica de T. stans documenta floración abundante, producción de néctar y polen y una biología reproductiva eficiente, con participación de insectos y aves como visitantes florales. Estos rasgos justifican evaluar su valor para corredores de polinizadores, pero no sustituyen inventarios locales ni análisis de riesgo de expansión (Singh et al., 2024).

4.3.3. Ecofisiología y respuesta al estrés

Bajo intervalos crecientes entre riegos, plántulas de T. stans reducen crecimiento y biomasa, y muestran disminuciones marcadas en fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática. Estos datos permiten describir una respuesta fisiológica al estrés hídrico, pero no sustentan por sí solos atribuir a la especie una fotosíntesis caulinar especializada. En el diseño restaurativo conviene usar variables de intercambio gaseoso y supervivencia como indicadores de desempeño (Alves et al., 2025).

4.3.4. Anatomía de la madera y xilema

La madera y el sistema vascular de T. stans requieren caracterización local antes de utilizar densidades o umbrales de cavitación como parámetros de diseño. No deben emplearse rangos de densidad ni explicaciones hidráulicas sin una fuente primaria específica para la especie; permanece como línea de investigación la relación entre anatomía xilemática y tolerancia al déficit hídrico.

Figura 15.

La madera y el sistema vascular de T. stans



4.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y Reproducción Forestal

4.4.1.Biología de semillas y serminación

Los estudios de germinación y conservación de T. stans muestran que la temperatura, la luz y las condiciones de almacenamiento influyen en la respuesta de las semillas; su comportamiento permite conservar germoplasma bajo condiciones controladas y diseñar protocolos reproducibles de vivero. Los porcentajes y tiempos deben citarse para el tratamiento concreto ensayado y no generalizarse a cualquier procedencia (Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018).

4.4.2. Inoculación simbiótica

La inoculación fúngica puede ser una línea experimental útil en restauración, pero la evidencia disponible no ofrece base suficiente para prescribir

Scleroderma verrucosum como simbionte obligatorio de T. stans. Para el Geoparque se recomienda ensayar consorcios micorrícicos nativos frente a controles no inoculados y seleccionar únicamente combinaciones que demuestren beneficios estadísticamente verificables.

4.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

4.5.1. Tipos de Silvicultura Restaurativa

La especie ha sido propuesta para revegetación de terrenos degradados por su plasticidad y tolerancia a condiciones ambientales variables. No obstante, su historial de invasividad en varias regiones obliga a usar procedencias y densidades controladas, monitorear regeneración espontánea y evitar promoverla donde pueda desplazar flora nativa (Singh et al., 2024).

4.6. TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

4.6.1. Fitoquímica y bioactivos

T. stans contiene numerosos metabolitos -entre ellos alcaloides, ácidos fenólicos y flavonoides- y cuenta con una extensa tradición etnofarmacológica. La literatura revisada reporta actividades hipoglucemiantes y otras acciones farmacológicas principalmente a nivel experimental; no deben presentarse como eficacia clínica demostrada ni como autorización para uso terapéutico sin evaluación de dosis y toxicidad (Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

4.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables

La recolección no destructiva de hojas o flores puede estudiarse como alternativa de abastecimiento de biomasa para investigación fitoquímica, pero no constituye por sí misma una cadena de biocomercio validada. Cualquier producto derivado debe incorporar estandarización química, evaluación de seguridad, requisitos regulatorios y trazabilidad del aprovechamiento (Anand & Basavaraju, 2021).

4.6.3. Biorrefinerías de segunda generación y farmacología

Los alcaloides de T. stans han mostrado actividad hipoglucemiante en modelos experimentales, y la revisión farmacológica resume múltiples actividades

preclínicas de extractos y compuestos aislados. Estas evidencias no equivalen a eficacia clínica ni autorizan recomendar suplementos terapéuticos. Una biorrefinería orientada a bioactivos debe priorizar fraccionamiento reproducible, identificación de compuestos, toxicología y cumplimiento regulatorio (Costantino et al., 2003; Anand & Basavaraju, 2021).

4.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

4.7.1. Usos medicinales y fitoterapéuticos

La literatura etnofarmacológica documenta ampliamente el uso tradicional de T. stans para hiperglucemia y otros trastornos, y revisa numerosos compuestos bioactivos. Estos antecedentes son preclínicos y etnobotánicos: no equivalen a una recomendación clínica ni permiten atribuir automáticamente prácticas específicas a comunidades del Valle del Chota sin investigación local (Anand & Basavaraju, 2021).

4.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

4.8.1. Preguntas de metacognición y debate

¿Qué mecanismos fisiológicos diferencian la resiliencia a la sequía basada en la respuesta fotosintética al estrés hídrico de T. stans frente a las especies que dependen únicamente de sistemas radiculares profundos?

Dado que existen resultados farmacológicos preclínicos para compuestos de T. stans, ¿qué pasos de seguridad, regulación y gobernanza del conocimiento deberían preceder cualquier propuesta comercial?

¿Cómo compararía experimentalmente costos, germinación y establecimiento entre siembra directa, semillas peletizadas y plantas de vivero en una ladera?

4.8.2. Reto práctico profesional

Bioingeniería de Viveros. Diseñe un ensayo piloto que compare semillas sin tratamiento, un tratamiento pregerminativo respaldado por literatura y una formulación experimental de semilla peletizada. Defina réplicas, variables de emergencia, supervivencia, costos y un criterio de decisión antes de escalar.

4.9. Referencias Bibliográficas

Singh, S., Miller, C. T., Singh, P., Sharma, R., Rana, N., Dhakad, A. K., & Dubey, R. K. (2024). A comprehensive review on ecology, life cycle and use of *Tecoma stans (Bignoneaceae). Botanical Studies*, 65, 6. https://doi.org/10.1186/s40529-024-00412-4

Vargas-Figueroa, J. A., & Torres-González, A. M. (2018). Germination and seed conservation of a pioneer species, Tecoma stans (Bignoniaceae), from tropical dry forest of Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 918–936. https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33423

Alves, M., Albuquerque, M. B. de, Pedroza Cruz, R. R., Jardelino Dias, T., & de Medeiros, E. C. (2025). Growth components and gas exchange in Tecoma stans L. plants under water stress. *Comunicata Scientiae*, 16, e4303. https://doi.org/10.14295/cs.v16.4303

Anand, M., & Basavaraju, R. (2021). A review on phytochemistry and pharmacological uses of Tecoma stans (L.) Juss. ex Kunth. *Journal of Ethnopharmacology,* 265, 113270. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113270

Costantino, L., Raimondi, L., Pirisino, R., Brunetti, T., Pessotto, P., Giannessi, F., Lins, A. P., Barlocco, D., Antolini, L., & El-Abady, S. A. (2003). Isolation and pharmacological activities of the Tecoma stans alkaloids. *Il Farmaco,* 58(9), 781–785. https://doi.org/10.1016/S0014-827X(03)00133-2

Capítulo 5: *Sapindus saponaria L.*: Propagación, Saponinas y Remediación Experimental en el Geoparque Imbabura.

Sapindus saponaria L. (Jaboncillo)

Figura 16.

Sapindus saponaria



5.1. Encabezado Científico

5.1.1. Resumen / Abstract

Sapindus saponaria destaca por sus saponinas, su dormancia seminal y el potencial de sus extractos como biosurfactantes. La evidencia verificada respalda tratamientos pregerminativos para superar dormancia física, actividad antifúngica de extractos y saponinas, y ensayos de remediación de suelo contaminado con gasoil en los que un tratamiento hidroalcohólico alcanzó 93,9 % de remoción bajo condiciones de laboratorio. Este porcentaje no se extrapola automáticamente a campo (Cabral et al., 2019; Tsuzuki et al., 2007; Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2021).

Palabras Clave / Keywords

Sapindus saponaria, Saponinas, Dormancia, Germinación, Depredación de semillas, Remediación experimental, Geoparque Imbabura.

5.2. Apertura Pedagógica

5.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Diseñar protocolos de germinación y control de calidad de semillas de Sapindus saponaria que consideren dormancia y depredación predispersiva.

Diseñar ensayos de remediación con extractos de Sapindus saponaria, distinguiendo resultados de laboratorio de eficacia esperada en campo.

Valorar la dimensión biocultural de S. saponaria, vinculando su uso tradicional afroecuatoriano con modelos modernos de bioeconomía circular (cero residuos).

5.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino

“La utilidad de un biosurfactante no elimina la obligación de medir su efecto ambiental” - Principio de precaución aplicado al jaboncillo.

5.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

5.3.1. Anatomía de la madera y xilema

La madera de S. saponaria se describe como dura en fuentes dendrológicas, pero la densidad de la madera no debe convertirse en una prueba indirecta de resistencia a cavitación sin mediciones hidráulicas específicas. La relación entre anatomía vascular y tolerancia a sequía se mantiene como hipótesis de investigación para procedencias del bosque seco andino.

5.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal

5.4.1. Biología de semillas y germinación

La dormancia física de S. saponaria puede superarse mediante tratamientos pregerminativos. Cabral et al. (2019) evaluaron la ruptura de dormancia y el efecto de temperatura y sustrato sobre la germinación; por ello, se mantiene el principio de escarificación y control ambiental, sin convertir espesores de testa, porcentajes aislados o criopreservación en parámetros universales sin fuente específica para cada afirmación (Cabral et al., 2019).

Figura 17.

Biología de semillas y germinación



5.4.2. Manejo en Vivero Forestal

El control de calidad de semillas debe considerar la depredación predispersiva documentada por Hernández-Jaramillo et al. (2012), quienes estudiaron el efecto de Leptostylus gibbulosus sobre la germinación. El sustrato, temperatura y método de descarte de semillas deben validarse en vivero mediante lotes controlados; los rangos térmicos no deben emplearse como prescripción universal cuando no provienen de la misma fuente (Hernández-Jaramillo et al., 2012).

5.4.3. Propagación a gámica (Vegetativa)

La literatura disponible no permite sostener que la propagación vegetativa sea universalmente “nula”. Para restauración se recomienda priorizar semilla cuando el objetivo sea conservar diversidad genética y evaluar ensayos de estaquillado solo con diseño experimental explícito.

5.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

- **Criterios de Plantación Regenerativa:** Las plántulas deben alcanzar 30-35 cm en vivero con raíz pivotante vigorosa antes de su trasplante para poder resistir la invasión de gramíneas exóticas agresivas.
- **Tipos de Silvicultura Restaurativa:** S. saponaria es una especie ingeniera. Su dosel provee sombra densa que suprime la evaporación del suelo, y la descomposición de su hojarasca mejora la capacidad de intercambio catiónico de los aridisoles, elevando el pH y creando camas ecológicas aptas para el reclutamiento de especies clímax.
- **Hidrología Forestal y Suelos:** La estabilización hídrica es biológica. Los HMA asociados al jaboncillo secretan 'glomalina', una glicoproteína termotolerante que actúa como un pegamento estructural, uniendo partículas de suelo en macroagregados hidrostables, deteniendo en seco la erosión laminar característica de Imbabura.
- **Sistemas Integradores Agroforestales**: Es idóneo para cortinas rompevientos y linderos arbóreos. Debido a la toxicidad de las saponinas foliares, el ganado bovino y caprino evita el ramoneo de sus hojas, garantizando el éxito de la plantación en sistemas silvopastoriles, proporcionando sombra vital (confort térmico) a los rebaños sin sufrir daño herbívoro.

5.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

5.6.1. Fitoquímica y bioactivos

Los frutos de S. saponaria son una fuente de saponinas con propiedades tensoactivas y actividad biológica. La literatura respalda actividad antifúngica y, más recientemente, su incorporación experimental como biosurfactante en formulaciones de jabón líquido (Tsuzuki et al., 2007; Paiva et al., 2026).

5.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

- **Usos Culturales e Identidad:** Históricamente, las comunidades afroecuatorianas y campesinas del Valle del Chota y Ambuquí utilizaban

los frutos en los ríos como detergente textil. Esta limpieza botánica impedía la eutrofización de las aguas, un conocimiento milenario respaldado por hallazgos arqueológicos mayas (Joya de Cerén) que evidencian su recolección precolombina.

- **Usos Medicinales y Fitoterapéuticos**: En la medicina tradicional, los lavados y cataplasmas de sus hojas combaten inflamaciones articulares, alopecia, úlceras dérmicas y operan como un poderoso antipirético y antiséptico. Nota bioética: su ingesta en embarazo está contraindicada por posible efecto citotóxico de las saponinas sistémicas.
- **Usos Alimentarios Funcionales:** Alta floración melífera apoya intensamente la apicultura local.
- **Usos Materiales:** La esclerenquimatosa semilla negra es un recurso valioso para la economía artesanal de las mujeres afrodescendientes, empleada en la confección de collares, bisutería, rosarios y utilizada históricamente por la niñez como canicas ('bolas') indestructibles.

5.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

5.8.1. Preguntas de metacognición y debate

Dado que las saponinas poseen actividad biológica, ¿qué pruebas ecotoxicológicas serían necesarias antes de descargar formulaciones basadas en S. saponaria en cuerpos de agua?

¿Cómo compararía propagación sexual y vegetativa de S. saponaria sin asumir de antemano la inviabilidad de uno de los métodos, y qué indicadores genéticos o productivos usaría?

5.8.2. Reto Práctico profesional

Logística de Viveros en Presencia de Depredadores de Semillas. Diseñe un flujograma de control de calidad para un lote de semillas de jaboncillo y proponga métodos de inspección o separación que permitan detectar daño por Leptostylus gibbulosus, justificando cómo validaría experimentalmente la eficacia del método elegido.

5.9. Referencias Bibliográficas

Cabral, A. L., Sales, J. de F., Barbosa, K. F., Rodrigues, A. A., Zuchi, J., Silva, J. M. D., & Vasconcelos Filho, S. C. (2019). Dormancy breakage and germination in Sapindus saponaria L. seeds as a function of temperature and germination substrate. Semina: *Ciências Agrárias*, 40(6Supl3), 3345–3358. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl3p3345

Tsuzuki, J. K., Svidzinski, T. I. E., Shinobu, C. S., Silva, L. F. A., Rodrigues-Filho, E., Cortez, D. A. G., & Ferreira, I. C. P. (2007). Antifungal activity of the extracts and saponins from Sapindus saponaria L. *Anais da Academia Brasileira de Ciências,* 79(4), 577–583. https://doi.org/10.1590/S0001-37652007000400002

Marín-Velásquez, T. D., & Arriojas-Tocuyo, D. D. J. (2021). Efecto remediador de extractos de Sapindus saponaria sobre un suelo contaminado con gasoil a nivel de laboratorio. *Ciencia & Desarrollo*, 20(1), 13–26. https://doi.org/10.33326/26176033.2021.1.1105

Paiva, M. J. M., Araujo, M. S., Carvalho, N. L., Paiva, R. F. D., Herrera, S. D. S. C., Vellano, P. O., D'Alessandro, W. B., Santos, T. T., & Souza, G. S. (2026). Application of Sapindus saponaria L. extract as a natural biosurfactant in liquid soap formulation. *Brazilian Journal of Biology*, 86, e300385. https://doi.org/10.1590/1519-6984.300385

Hernández-Jaramillo, A., Pinzón, O. P., & Parrado-Rosselli, Á. (2012). Depredación de las semillas de Sapindus saponaria L. por Leptostylus gibbulosus Bates (Coleoptera: Cerambycidae) y su efecto en la germinación. *Colombia Forestal*, 15(2), 247–260. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a08

Capítulo 6: *Bursera graveolens* (Kunth) *Triana & Planch*: Estructura Poblacional, Aceites Esenciales y Bioeconomía No Maderable en el Geoparque Imbabura.

Bursera graveolens (Kunth) *Triana & Planch* (Palo Santo)

Figura 18.

Bursera graveolens



6.1. Encabezado Científico

6.1.1. Resumen / Abstract

Bursera graveolens se aborda como PFNM del bosque seco con énfasis en conservación poblacional y aceites esenciales. Un estudio del sur de Ecuador registró una estructura diamétrica sin patrón de J invertida, interpretada preliminarmente como señal de déficit de regeneración y presión de pastoreo caprino. Estudios químicos en Ecuador identifican limoneno y α-terpineol entre los principales componentes del aceite esencial, mientras otros trabajos documentan actividad fumigante y repelente. La denominada “regla 30+2” no debe emplearse como norma universal, pues no se dispone de una fuente primaria normativa suficientemente robusta que la sustente (Benítez et al., 2023; Fon-Fay et al., 2019; Jaramillo-Colorado et al., 2019).

Palabras Clave / Keywords

Bursera graveolens, Aceites esenciales, Estructura poblacional, Bioeconomía no maderable, Geoparque Imbabura, Trazabilidad.

6.2. Apertura Pedagógica

6.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Diseñar modelos de bioeconomía circular aplicando criterios verificables de trazabilidad y aprovechamiento no maderable que no comprometan la biomasa viva.

Comparar métodos de propagación sexual y vegetativa de Bursera graveolens mediante ensayos con procedencias documentadas, sin asumir de antemano un método superior.

Interpretar cromatogramas del aceite esencial de B. graveolens y evaluar críticamente su potencial como biocida botánico sin extrapolar actividad experimental a eficacia clínica.

6.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino

"La verdadera esencia solo se revela después de la muerte" - Una alegoría estoica y biológica al aprovechamiento precautorio de material no maderable, donde el árbol entrega su máxima virtud curativa y aromática únicamente cuando ha cumplido su ciclo vital y es transformado por la red trófica del suelo.

6.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

6.3.1. Ecofisiología y respuesta al estrés

En poblaciones estudiadas del sur de Ecuador, Benítez et al. (2023) registraron una densidad aproximada de 24 individuos ha−1, DAP medio de 31,9 cm y una estructura diamétrica que no mostró la distribución de J invertida esperada bajo regeneración continua. Los autores interpretan el patrón como una señal que merece atención y mencionan la presión de pastoreo; este patrón no debe convertirse en diagnóstico universal de todas las poblaciones de B. graveolens (Benítez et al., 2023).

6.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal

- **Biología de Semillas y Germinación:** Las drupas poseen alta dormancia endógena y barreras mecánicas. El mejor protocolo germinativo exige escarificación mecánica profunda, desinfección con hipoclorito de sodio al 75% por 5 minutos, e imbibición en ácido giberélico (AG3 a 0.5 mg/L), logrando apenas un 11.11% de germinación.
- **Propagación Agámica (Vegetativa):** Ante la baja germinación, el estaquillado es la técnica silvicultural más escalable. Investigaciones demostraron que el éxito no depende de la auxina (AIB) sino de la porosidad del sustrato. El sustrato "A3" (mezcla de tierra negra y arena de río) logró el máximo prendimiento (51.88%) al prevenir la pudrición radicular.
- **Técnicas de Micropropagación:** In vitro, la yema apical responde óptimamente a bencilaminopurina (BAP a 1 mg/L) para brotación múltiple. La inducción de callos embriogénicos se maximiza (63.33%) con la auxina 2,4-D a 1 mg/L.
- **Inoculación Simbiótica:** La supervivencia en los someros suelos de Imbabura (10-30 cm) requiere inoculación con Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA), alcanzando una colonización cortical del 68.3%. Estos hongos solubilizan fosfatos y secretan glomalina para cohesionar partículas minerales.

6.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

- Tipos de Silvicultura Restaurativa (Especie Nodriza): B. graveolens requiere de facilitación ecológica en sus estadios primarios. En los Valles del Chota y Ambuquí, se asocia y co-domina con Vachellia macracantha (faique). Las plántulas de palo santo deben instalarse bajo el microclima protector y enriquecido en nitrógeno que provee el dosel de estas leguminosas pioneras.
- Corredores Biológicos y Zoocoria: La dispersión de sus semillas depende de la avifauna y reptiles endémicos. Estudios espaciales muestran que el 86% de los juveniles exitosos se establecen a más de 3 metros del árbol

madre, y alcanzan radios de dispersión de hasta 35 metros mediada por vectores animales.

- Hidrología Forestal y Suelos: La matriz radicular profunda del palo santo, amplificada por las redes miceliales (HMA), ancla biomecánicamente los delgados y escarpados suelos de la Formación Ambuquí, mitigando deslizamientos catastróficos frente a las lluvias torrenciales.

6.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

6.6.1. Fitoquímica y bioactivos

El aceite esencial de B. graveolens presenta una composición variable según procedencia y tejido. En material de Manabí se identificaron 99 compuestos; limoneno (34,9 %) y α-terpineol (13,4 %) fueron los componentes principales. Otros ensayos han documentado propiedades fumigantes y repelentes del aceite (Fon-Fay et al., 2019; Jaramillo-Colorado et al., 2019).

6.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables

El aceite esencial de B. graveolens mostró actividad repelente y fumigante contra Tribolium castaneum en ensayos de laboratorio; el estudio reportó repelencia de 88,1–88,6 % al 1 % y LC50 fumigante de 108,2 µg de aceite mL−1 de aire. Estos resultados apoyan investigación en biocidas botánicos, pero deben validarse en formulaciones, especies objetivo y condiciones de uso antes de escalarse (Jaramillo-Colorado et al., 2019).

6.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y Etnobotánica

6.7.1. Usos medicinales y fitoterapéuticos

En revisiones de plantas medicinales ecuatorianas, Bursera graveolens aparece asociada a usos tradicionales para artritis y como remedio analgésico/sedante, además del uso aromático de la corteza como incienso. La composición del aceite esencial ecuatoriano incluye limoneno y α-terpineol entre sus componentes principales. Estos antecedentes deben diferenciarse de cualquier atribución etnomédica específica a una comunidad concreta si no existe documentación de campo (Armijos et al., 2021; Fon-Fay et al., 2019).

6.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

6.8.1. Conclusiones biocibernéticas

La prioridad de manejo para B. graveolens es compatibilizar el valor no maderable de sus aceites con la persistencia demográfica de las poblaciones. La ausencia de una estructura de J invertida en poblaciones estudiadas del sur de Ecuador obliga a tratar la regeneración como variable de control. La bioeconomía solo debe escalar si el monitoreo demuestra reclutamiento suficiente y trazabilidad del material aprovechado (Benítez et al., 2023; Fon-Fay et al., 2019).

6.8.2. Preguntas de metacognición y debate

¿Qué implicaciones genéticas y operativas tendría priorizar propagación clonal sobre reproducción sexual en B. graveolens, y qué datos serían necesarios para comparar ambos métodos?

¿Qué mecanismos de trazabilidad, monitoreo poblacional y control de origen deberían acompañar una cadena comercial de aceite esencial de B. graveolens para evitar incentivos a la extracción ilegal?

¿Qué experimento diseñaría para comparar composición química y degradación de albura y duramen de B. graveolens sin asumir de antemano una preferencia de organismos xilófagos?

6.8.3. Reto práctico profesional

Mapeo de Biorrefinería con Trazabilidad. Diseñe el flujo de operaciones de una cooperativa comunitaria de palo santo partiendo de material legal y georreferenciado, incorporando extracción de aceite, manejo de residuos y un sistema de control que vincule la tasa de aprovechamiento con el monitoreo de regeneración. Indique qué datos económicos serían necesarios antes de afirmar rentabilidad.

6.9. Referencias Bibliográficas

Armijos, C., Ramírez, J., Salinas, M., Vidari, G., & Suárez, A. I. (2021). Pharmacology and Phytochemistry of Ecuadorian Medicinal Plants: *An*

Update and Perspectives. Pharmaceuticals, 14(11), 1145. https://doi.org/10.3390/ph14111145

Benítez, Á., Chalán, J., Tinitana, F., Morocho, V., Armijos, L., & Malagon, O. (2023). Estructura diamétrica de Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch: especie con potencial uso no maderable. *Bosques Latitud Cero*, 13(2), 70–79. https://doi.org/10.54753/blc.v13i2.1658

Fon-Fay, F. M., Pino, J. A., Hernández, I., Rodeiro, I., & Fernández, M. D. (2019). Chemical composition and antioxidant activity of Bursera graveolens (Kunth) Triana et Planch essential oil from Manabí, Ecuador. *Journal of Essential Oil Research*, 31(3), 211–216. https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1564381

Jaramillo-Colorado, B. E., Suarez-López, S., & Marrugo-Santander, V. (2019). Volatile chemical composition of essential oil from Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch and their fumigant and repellent activities. *Acta Scientiarum. Biological Sciences,* 41, e46822. https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v41i1.46822

Capítulo 7: *Jatropha curcas L.:* Bioenergía, Toxicología de Ésteres de Forbol y Detoxificación de Coproductos en el Geoparque Imbabura.

Jatropha curcas L.: Bioenergía, Toxicología de Ésteres de Forbol y Detoxificación de Coproductos en el Geoparque Imbabura.

Figura 19.

Jatropha curcas L. (Piñón)



7.1. Encabezado Científico

7.1.1. Resumen / Abstract

Jatropha curcas se examina como cultivo multipropósito para bioenergía y valorización de coproductos. La literatura de revisión documenta su cadena desde el establecimiento hasta el biodiésel, pero también advierte que la toxicidad de los ésteres de forbol limita el uso alimentario de aceite y torta. Existen estrategias de detoxificación microbiana verificadas: Pseudomonas aeruginosa PseA degrada ésteres de forbol durante fermentación en estado sólido y hongos de pudrición blanca pueden reducirlos hasta niveles no detectables en determinadas condiciones. La restauración de laderas debe separar evidencia genérica sobre refuerzo radical de resultados específicos de Jatropha (Contran et al., 2013; Joshi et al., 2011; Bose & Keharia, 2014; Cao et al., 2025).

Palabras Clave / Keywords

Jatropha curcas, Ésteres de forbol, Detoxificación, Biodiésel, Coproductos, Toxicología, Geoparque Imbabura.

7.2. Apertura Pedagógica

7.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Diseñar ensayos silviculturales que comparen plantas de semilla y material vegetativo de Jatropha curcas, midiendo arquitectura radical y estabilidad antes de recomendar un método para laderas.

Estructurar una biorrefinería que incluya extracción de aceite, detoxificación verificable de ésteres de forbol y evaluación de seguridad del residuo antes de proponer usos agronómicos.

Analizar críticamente riesgos socioambientales de plantaciones bioenergéticas y comparar modelos centralizados con alternativas de gobernanza comunitaria.

7.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino

"La transformación útil de un residuo comienza por reconocer y controlar sus riesgos" - Un principio biocibernético que nos recuerda que las potentes toxinas defensivas del piñón, si son transformadas por la red fúngica, se convierten en el abono que restaura la tierra erosionada.

7.3. BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

7.3.1. Dendrología y morfología

Jatropha curcas es un arbusto o árbol pequeño de Euphorbiaceae ampliamente estudiado como cultivo multipropósito. Las revisiones describen un sistema radical cuya arquitectura depende del método de propagación, hojas caducas en condiciones de estrés y frutos capsulares con semillas oleaginosas. La variabilidad entre accesiones es alta, por lo que los parámetros dendrométricos deben reportarse por procedencia (Divakara et al., 2010; Abdelgadir & Van Staden, 2013).

7.3.2. Fisiología y fenología de la especie

La especie es monoica y su floración y fructificación responden fuertemente a ambiente y manejo. La literatura destaca su adaptación a regiones tropicales y subtropicales y su tolerancia relativa a sequía, pero también subraya que productividad y requerimientos agronómicos varían ampliamente; por ello, la idea de que prospera sin insumos en cualquier tierra marginal debe evitarse (Divakara et al., 2010).

7.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción rorestal

7.4.1. Biología de semillas y germinación

La calidad del material de siembra de J. curcas influye en establecimiento y rendimiento, pero no debe asumirse como protocolo universal una accesión específica, un porcentaje fijo de aceite ni un contenido de humedad de cosecha que no estén vinculados de forma inequívoca a la fuente citada. Se recomienda documentar procedencia, viabilidad, humedad y contenido de aceite de cada lote antes de producir plantas (Contran et al., 2013).

7.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

7.5.1. Hidrología forestal y suelos

La arquitectura radical de árboles y arbustos puede aumentar el refuerzo del suelo, pero la resistencia a tracción es altamente dependiente de especie, diámetro radical y condiciones edáficas. El rango de 64–478 kPa no debe atribuirse directamente a J. curcas, porque procede de evidencia general sobre raíces y estabilidad de laderas, no de una medición específica de la especie. Para el Geoparque se requieren ensayos mecánicos locales antes de usar el piñón como “soil nailing” cuantificado (Hairiah et al., 2020).

7.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

7.6.1. Fitoquímica y bioactivos

Los ésteres de forbol constituyen el principal problema toxicológico de los productos de J. curcas y requieren cuantificación y detoxificación antes de considerar usos sensibles. Una revisión toxicológica reciente resume efectos agudos y crónicos y propone objetivos de reducción muy exigentes para escenarios de consumo humano. En un modelo regenerativo, la torta sin detoxificar no debe entrar en cadenas alimentarias (Cao et al., 2025).

7.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables

El aceite de J. curcas es una materia prima ampliamente estudiada para biodiésel y su composición incluye ácidos grasos de interés para transesterificación. Sin embargo, el desempeño del combustible depende del aceite, del proceso y de la norma aplicada. La valorización de ésteres de forbol como biopesticidas debe separarse del uso del combustible y someterse a evaluación toxicológica y regulatoria específica (Contran et al., 2013; Cao et al., 2025).

7.6.3.Biorrefinerías de segunda generación y economía circular

Tras la extracción del aceite, la torta de Jatropha conserva materia orgánica y nutrientes, pero su valorización exige controlar los ésteres de forbol. Joshi et al. (2011) demostraron degradación mediante Pseudomonas aeruginosa PseA en fermentación sólida; Bose y Keharia (2014) mostraron reducciones mediante hongos de pudrición blanca y niveles no detectables con determinados tratamientos. La detoxificación química o microbiológica debe verificarse analíticamente y acompañarse de ensayos de seguridad antes de destinar el residuo a uso agronómico o alimentario (Joshi et al., 2011; Bose & Keharia, 2014; Cao et al., 2025).

7.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

7.7.1. Usos Medicinales y fitoterapéuticos

J. curcas posee una extensa historia etnomedicinal en distintas regiones, pero sus semillas y otras fracciones contienen compuestos tóxicos. La revisión de Abdelgadir y Van Staden (2013) documenta usos tradicionales y actividades farmacológicas experimentales, al tiempo que enfatiza toxicidad; cualquier uso medicinal debe tratarse como antecedente etnobotánico, no como recomendación terapéutica (Abdelgadir & Van Staden, 2013).

7.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

7.8.1. Preguntas de metacognición y debate

¿Cómo compararía arquitectura radical y estabilidad de plantas de J. curcas obtenidas por semilla y por propagación vegetativa antes de recomendar una técnica para laderas?

Compare un modelo bioenergético centralizado con uno de gobernanza comunitaria e identifique qué variables de la Biosfera, Tecnosfera y Socio Sfera deberían medirse para evaluar su viabilidad.

¿Qué mecanismos enzimáticos pueden participar en la degradación microbiana de ésteres de forbol y cómo diseñaría un ensayo que compruebe la detoxificación antes de reutilizar la torta de semilla?

7.8.2. Reto Práctico profesional

Diseño de Biorrefinería de Segunda Generación. Elabore un diagrama de flujo para extracción de aceite y tratamiento de la torta de Jatropha. Incluya una etapa de detoxificación, un método analítico para verificar ésteres de forbol residuales y criterios de seguridad que deban cumplirse antes de asignar un uso al coproducto.

7.9. Referencias Bibliográficas

Abdelgadir, H. A., & Van Staden, J. (2013). Ethnobotany, ethnopharmacology and toxicity of Jatropha curcas L. (Euphorbiaceae): A review. *South African Journal of Botany*, 88, 204–218. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.07.021

Divakara, B. N., Upadhyaya, H. D., Wani, S. P., & Laxmipathi Gowda, C. L. (2010). Biology and genetic improvement of Jatropha curcas L.: *A review. Applied Energy*, 87(3), 732–742. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.013

Contran, N., Chessa, L., Lubino, M., Bellavite, D., Roggero, P. P., & Enne, G. (2013). State-of-the-art of the Jatropha curcas productive chain: From sowing to biodiesel and by-products. *Industrial Crops and Products*, 42, 202–215. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.037

Joshi, C., Mathur, P., & Khare, S. K. (2011). Degradation of phorbol esters by Pseudomonas aeruginosa PseA during solid-state fermentation of deoiled Jatropha curcas seed cake. *Bioresource Technology,* 102(7), 4815–4819. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.039

Bose, A., & Keharia, H. (2014). Phorbol ester degradation in Jatropha seedcake using white rot fungi. *3 Biotech*, 4, 447–450. https://doi.org/10.1007/s13205-013-0174-9

Cao, X., Wei, X., Shao, Y., Li, D., & Zhu, J. (2025). Jatropha curcas seed oil for possible human consumption: A toxicological assessment of its phorbol esters. *Toxicology Reports*, 14, 101870. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101870

Hairiah, K., Widianto, Suprayogo, D., & Van Noordwijk, M. (2020). Tree Roots Anchoring and Binding Soil: *Reducing Landslide Risk in Indonesian Agroforestry.* Land, 9(8), 256. https://doi.org/10.3390/land9080256

Capítulo 8: *Calliandra pittieri Standl.:* Taxonomía, Ecología Funcional y Validación Territorial para la Restauración del Geoparque Imbabura.

Calliandra pittieri Standl. (Carbonero / Pluma de Yátero)

Figura 20.

Calliandra pittieri Standl.



8.1. Encabezado Científico

8.1.1. Resumen / Abstract

Calliandra pittieri es una especie aceptada de Fabaceae y su distribución nativa incluye Ecuador. Sin embargo, Plants of the World Online la caracteriza principalmente como propia de biomas tropicales húmedos; por ello, corresponde aplicar un criterio precautorio: su uso como especie estructural del bosque seco del Valle del Chota no se presenta como hecho consolidado sin inventarios locales y ensayos de establecimiento. La taxonomía y la morfología de semillas constituyen la base científica disponible; los valores de proteína, °Brix, actividad biopesticida y usos culturales específicos deben tratarse como líneas de investigación o hipótesis territoriales hasta contar con validación directa (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Govaerts et al., 2021; Leython, 2010).

Palabras Clave / Keywords

Calliandra pittieri, Fabaceae, Validación ecológica, Agroforestería, Investigación biocultural, Geoparque Imbabura.

8.2. Apertura Pedagógica

8.2.1. Resultados de Aprendizaje (Competencias)

Diseñar ensayos de establecimiento de Calliandra pittieri que evalúen su compatibilidad ecológica y sus posibles funciones agroforestales bajo condiciones locales.

Definir variables y métodos para evaluar néctar, visitantes florales, calidad forrajera y potencial de biocomercio de Calliandra pittieri sin asumir valores previos.

Diseñar una investigación etnobotánica que documente, con identificación botánica y consentimiento, los usos culturales atribuidos al carbonero en comunidades afroecuatorianas.

8.2.2. Máxima Filosófica / Axioma Andino

"Restaurar también significa reconocer lo que sabemos y lo que todavía debemos medir en el territorio" - Un recordatorio de que, en el Geoparque Imbabura, la biología que estabiliza la tierra es inseparable de la cultura que le da voz.

8.3. LA BIOSFERA: Maquinaria Biológica y Ecofisiología

8.3.1. Dendrología y Morfología

Plants of the World Online reconoce Calliandra pittieri Standl. como especie aceptada de Fabaceae y registra a Ecuador dentro de su distribución nativa. El estudio morfológico de Leython (2010) aporta criterios de semillas para especies del género Calliandra, pero no justifica por sí solo trasladar a C. pittieri dimensiones de copa, DAP o número de folíolos como valores universales. Para restauración se recomienda confirmar la identidad con material de herbario y documentar morfometría de las procedencias locales (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Leython, 2010).

8.3.2. Ecofisiología y respuesta al estrés

La evidencia taxonómica confirma la presencia nativa de C. pittieri en Ecuador, pero la fuente global de Kew la asocia primariamente con bioma tropical húmedo. Por ello, no existe base suficiente para atribuir a poblaciones del Chota un rango térmico extremo de 5–43 °C ni una tolerancia simultánea a sequía e inundación. La tolerancia ecofisiológica debe medirse con procedencias locales antes de prescribir la especie para restauración de ambientes áridos (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.).

8.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal

8.4.1. Biología de semillas y germinación

Los estudios morfológicos del género Calliandra aportan criterios para describir semillas y plántulas, pero los tratamientos pregerminativos deben validarse específicamente para la procedencia empleada. No debe fijarse como protocolo universal la inmersión por 12 horas y la emergencia a los 4–5 días sin una fuente primaria inequívoca para C. pittieri (Leython, 2010).

8.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

- **Criterios de Plantación Regenerativa:** Trasplantada a campo al inicio de las lluvias primaverales o de otoño, su rápido crecimiento apical la hace idónea para ganar competencia a malezas agresivas. Responde excepcionalmente al recepe (coppicing), rebrotando vigorosamente para manejo en rotación.
- **Tipos de Silvicultura Restaurativa:** Actúa como Especie Nodriza pionera de alta resiliencia. Su copa aparasolada crea un microclima atemperado (bloqueando radiación UV y heladas radiativas) bajo el cual germinan especies clímax nativas (esciófitas), facilitando la sucesión secundaria pasiva.
- **Hidrología Forestal y Suelos:** En bioingeniería, su raíz pivotante profunda y su tolerancia al hidromorfismo la hacen perfecta para la estabilización ripariana, anclando taludes de quebradas propensos al colapso (como en el geositio San Jerónimo) y disipando la energía hidrocinética de las riadas.

- **Sistemas Integradores Agroforestales:** A elevaciones medias (1.000 - 1.600 m.s.n.m.), se utiliza masivamente como "árbol de sombrío" en cafetales (Coffea arabica), filtrando luxes y moderando el microclima. En ganadería, se siembra en linderos y bancos forrajeros mixtos.

8.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

8.6.1. Bioemprendimientos biobasados escalables

El potencial productivo de C. pittieri debe ser evaluado localmente antes de asignarle cifras de proteína de forraje, concentración de azúcares del néctar o eficacia insecticida. Esos valores deben analizarse como variables de investigación aplicada cuando no exista una fuente primaria específica que los sustente.

8.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

8.7.1. Usos Culturales e identidad

La relación entre árboles del bosque seco y el patrimonio afroecuatoriano es un tema relevante para investigación biocultural; sin embargo, no debe atribuirse a C. pittieri un uso específico en instrumentos de la Bomba del Chota sin documentación etnobotánica directa. Ese vínculo se formula como pregunta de campo que debe ser validada mediante entrevistas, identificación botánica del material y trazabilidad cultural.

8.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

8.8.1. Preguntas de metacognición y debate

¿Cómo diseñaría un estudio para medir concentración de azúcares del néctar, visitantes florales y posibles efectos sobre polinizadores antes de promover C. pittieri en un agroecosistema?

Si una investigación etnobotánica confirmara usos maderables o culturales de C. pittieri, ¿qué mecanismos de gobernanza y monitoreo serían necesarios para asegurar un aprovechamiento compatible con su regeneración?

¿Qué datos de productividad, calidad forrajera, costos y supervivencia serían necesarios antes de proponer C. pittieri como componente de un sistema silvopastoril?

8.8.2. Reto Práctico profesional

Diseño de Validación Agroforestal. Proponga un ensayo en bloques que compare C. pittieri con una especie de sombra local ya validada y un control sin árbol. Defina espaciamiento inicial, variables de sombra, supervivencia, crecimiento del cultivo, suelo y biodiversidad; no escale el uso hasta demostrar compatibilidad ecológica y productiva.

8.9. Referencias Bibliográficas

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). Calliandra pittieri Standl. Plants of the World Online. *Recuperado el 2 de septiembre de 2026*, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:42259-2

Govaerts, R., Nic Lughadha, E., Black, N., Turner, R., & Paton, A. (2021). The World Checklist of Vascular Plants, a continuously updated resource for exploring global plant diversity. *Scientific Data*, 8, 215. https://doi.org/10.1038/s41597-021-00997-6

Leython, S. (2010). Estudio morfológico de semillas del género Calliandra Benth. *Acta Botánica Venezuelica,* 33(1). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0084-59062010000100004

Capítulo 9: *Inga feuilleei DC*.: Propagación Vegetativa, Agroforestería y Validación Ecológica en el Geoparque Imbabura.

Inga feuilleei DC. (Pacay / Guaba de Cajón)

Figura 21.

Propagación Vegetativa, Agroforestería y Validación Ecológica en el Geoparque Imbabura.



9.1. Encabezado Científico

Resumen / Abstract

Inga feuilleei se estudia como árbol agroforestal de fruto comestible y propagación desafiante. Plants of the World Online acepta el nombre Inga feuilleei DC., registra a Ecuador como área nativa y la caracteriza principalmente como especie de bioma tropical húmedo; por ello, no debe presentarse como hecho una adaptación extrema a aridisoles del Valle del Chota sin ensayos locales. La evidencia primaria más sólida procede de la monografía taxonómica del género y de ensayos de propagación vegetativa: Brennan y Mudge (1998) obtuvieron enraizamiento de estacas foliosas bajo condiciones controladas y 100 % de enraizamiento de acodos aéreos en cinco semanas. Las cifras de carbono se presentan a escala de sistemas agroforestales cuando la fuente no es

específica de la especie (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Pennington, 1997; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

Palabras Clave / Keywords

Inga feuilleei, Propagación vegetativa, Agroforestería andina, Fruto comestible, Carbono a escala de sistema, Geoparque Imbabura.

9.2. Apertura Pedagógica

9.2.1. Resultados de Aprendizaje (Competencias)

Diseñar protocolos comparativos de propagación sexual y vegetativa de Inga feuilleei, incluyendo manejo de semillas frescas y acodos o estacas bajo condiciones controladas.

Modelar la contribución de Inga feuilleei dentro de sistemas agroforestales, separando mediciones de la especie de indicadores de carbono y nutrientes a escala del sistema.

Articular la evidencia alimentaria y de compuestos bioactivos del fruto con estrategias de valorización agroindustrial, evitando atribuciones terapéuticas no demostradas.

9.2.2. Máxima Filosófica / Axioma andino

"La sombra que acompaña al cultivo y el fruto que alimenta recuerdan que una especie agroforestal debe evaluarse por múltiples servicios, no por una sola cifra" - Un recordatorio biocibernético de que la generosidad de la guaba, que regala nitrógeno a la tierra y sombra al cafetal, es la base de la abundancia comunitaria.

9.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

9.3.1. Dendrología y morfología

Inga feuilleei DC. es un nombre aceptado y Ecuador forma parte de su distribución nativa. La monografía de Pennington (1997) constituye la referencia botánica central para el género Inga. La identificación taxonómica y el carácter arbóreo/frutal están respaldados; en cambio, la profundidad de raíces, el acceso

a acuíferos y la resistencia mecánica al viento requieren evidencia específica antes de afirmarse. La caracterización para Imbabura debe apoyarse en ejemplares voucher y mediciones locales (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Pennington, 1997).

9.3.2. Ecofisiología y respuesta al estrés

POWO registra a I. feuilleei principalmente en bioma tropical húmedo y no respalda, por sí solo, la afirmación de que sea una excepción xerofítica del género capaz de prosperar de forma característica con 500–750 mm anuales en aridisoles alcalinos. Para el Geoparque Imbabura, esa tolerancia debe tratarse como hipótesis de procedencia y evaluarse mediante supervivencia, crecimiento, potencial hídrico y propiedades del suelo en parcelas locales (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.).

9.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal

9.4.1. Biología de semillas y germinación

La conservación de semillas de Inga es operativamente sensible y debe documentarse por procedencia. No debe asumirse como hecho el “viviparismo críptico” ni establecer tiempos universales de viabilidad sin una fuente primaria específica para I. feuilleei. Se recomienda cosecha de semillas maduras, siembra rápida y ensayos controlados de tolerancia a desecación y almacenamiento antes de fijar un protocolo.

9.4.2. Propagación agámica (Vegetativa)

La propagación vegetativa de I. feuilleei cuenta con evidencia experimental directa. Brennan y Mudge (1998) evaluaron estacas semileñosas y acodos aéreos; los acodos alcanzaron 100 % de enraizamiento dentro de cinco semanas en las condiciones del estudio, mientras la respuesta de las estacas dependió de hojas, manejo de humedad, diámetro y auxina. Por tanto, se corrige la cifra genérica de 97 % y se vincula el protocolo al tratamiento ensayado (Brennan & Mudge, 1998).

9.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

9.5.1. Hidrología forestal y suelos

La contribución de Inga a sistemas agroforestales debe evaluarse a escala de sistema: cobertura, materia orgánica, carbono y reciclaje de nutrientes dependen del manejo, densidad y especies acompañantes. En Imbabura y Carchi existen datos de fijación de carbono para sistemas agroforestales de pequeños productores, pero esos valores no deben atribuirse automáticamente a I. feuilleei como tasa específica (Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

9.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

9.6.1. Fitoquímica y bioactivos

Un estudio reciente del pacay peruano caracterizó nutrientes y compuestos bioactivos del fruto de Inga feuilleei, confirmando su interés como alimento y materia prima para valorización agroindustrial. Las concentraciones dependen de tejido, procedencia y estado de madurez, por lo que deben evitarse extrapolaciones a hojas o semillas no analizadas en la misma investigación (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026).

9.6.2. Usos Dendroenergéticos y carbono

La biomasa podada puede reincorporarse al sistema como cobertura o materia orgánica y, según el diseño productivo, tener otros usos. Las cifras de carbono deben reportarse para parcelas y sistemas medidos; no debe asignarse a I. feuilleei una tasa fija de 8,76 Mg CO2 ha−1 cuando la referencia disponible corresponde a sistemas agroforestales andinos multiespecíficos (Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

9.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y Etnobotánica

9.7.1. Usos Alimentarios funcionales

POWO registra el uso alimentario de I. feuilleei y la literatura reciente confirma valor nutricional y presencia de compuestos bioactivos en el fruto. Esto sustenta

su aprovechamiento alimentario, pero no justifica atribuir propiedades terapéuticas clínicas sin estudios específicos (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026).

9.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

9.8.1. Preguntas de metacognición y debate

¿Qué riesgos de diversidad genética tendría establecer un sistema agroforestal con clones de un único árbol madre de I. feuilleei y cómo diseñaría una estrategia de procedencias múltiples?

¿Cómo diseñaría una cadena logística de semillas de Inga feuilleei que permita medir pérdida de viabilidad durante transporte y almacenamiento antes de fijar límites operativos de tiempo y humedad?

¿Cómo evaluaría experimentalmente las interacciones entre nectarios extraflorales, hormigas y manejo de insecticidas en un sistema con Inga, evitando asumir de antemano un efecto protector?

9.8.2. Reto Práctico profesional

Estructuración de Vivero Clonal. A partir de Brennan y Mudge (1998), diseñe un protocolo piloto de estacas foliosas y acodos aéreos de I. feuilleei. Identifique qué variables del estudio original deben mantenerse, cuáles deben recalibrarse para Imbabura y qué criterio de éxito usaría antes de escalar la producción.

9.9. Referencias Bibliográficas

Cotacallapa-Sucapuca, M., Cámara, R. M., Ciudad-Mulero, M., Serruto-Medina, G., Vilca-Curo, R., Arribas, C., Pedrosa, M. M., Morales, P., & Cámara, M. (2026). *Nutrients and Bioactive Compounds in Peruvian Pacay* (Inga feuilleei D.C.). Foods, 15(2), 278. https://doi.org/10.3390/foods15020278

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Inga feuilleei* DC. Plants of the World Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:128507-2

Pennington, T. D. (1997). The genus Inga: Botany. Royal Botanic Gardens*, Kew.* https://shop.kew.org/the-genus-inga-botany

Brennan, E. B., & Mudge, K. W. (1998). Vegetative propagation of Inga feuillei from shoot cuttings and air layering. *New Forests*, 15(1), 37–51. https://doi.org/10.1023/A:1006594207046

Añazco-Romero, M., & Fernández-Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 32–42. https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1089

Capítulo 10: *Inga insignis Kunth:* Conservación, Micropropagación y Agroforestería Andina en el Geoparque Imbabura.

Inga insignis Kunth (Guaba de Zorro)

Figura 22.

Conservación, micropropagación y agroforestería andina



10.1. Encabezado Científico

Resumen / Abstract

Inga insignis se aborda desde conservación, propagación y agroforestería en Imbabura. Plants of the World Online acepta el taxón, registra distribución nativa de Colombia a Perú -incluido Ecuador- y lo asocia principalmente con bioma tropical húmedo. Una fuente local de micropropagación advierte pérdida rápida de viabilidad de semillas y desarrolla un protocolo in vitro a partir de yemas; por ello, no debe asumirse que sus semillas sean “intermedias” con 80 % de viabilidad a 13,8 % de humedad, ni utilizar proyecciones climáticas procedentes de un preprint no revisado por pares como evidencia consolidada (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Pennington, 1997; Villamar Flores, s. f.; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

Palabras Clave / Keywords

Inga insignis, Conservación de germoplasma, Micropropagación, Agroforestería, Carbono a escala de sistema, Geoparque Imbabura.

10.2. Apertura Pedagógica

10.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Cuantificar carbono y dinámica de nutrientes en sistemas agroforestales con Inga insignis, distinguiendo claramente la contribución de la especie de la del arreglo completo.

Diseñar protocolos de conservación y vivero para Inga insignis basados en material fresco, colecciones vivas y micropropagación cuando corresponda.

Diseñar criterios de priorización de restauración con ocurrencias verificadas, clima, suelo y ensayos de procedencia, antes de proyectar cambios futuros del hábitat.

10.2.2. Máxima Filosófica / Axioma Andino

"La sombra agroforestal solo se vuelve evidencia de restauración cuando sus efectos sobre suelo, cultivo y biodiversidad son medidos" - Un axioma biocibernético que ilustra la reciprocidad de la guaba: su copa protege el sustento agrícola humano, mientras sus raíces evitan el colapso del paisaje.

10.3. LA BIOSFERA: Maquinaria Biológica y Ecofisiología

10.3.1. Dendrología y morfología

Inga insignis Kunth es un nombre aceptado con distribución nativa desde Colombia hasta Perú, incluido Ecuador. La monografía de Pennington (1997) permite situarla taxonómicamente dentro del género; las dimensiones de copa, DAP, coloración juvenil o supuestas adaptaciones radiculares no deben convertirse en parámetros universales cuando no proceden de la fuente específica revisada. Para Imbabura se recomienda documentar ejemplares voucher y morfometría de poblaciones locales (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Pennington, 1997).

10.3.2. Ecofisiología y respuesta al estrés

POWO caracteriza a I. insignis principalmente como árbol de bioma tropical húmedo. En consecuencia, no deben asumirse como datos consolidados un rango altitudinal extremo, una preferencia excepcional por suelos alcalinos ni un umbral de 500–750 mm de precipitación sin evidencia específica reproducible. Su desempeño en el bosque seco de Imbabura debe demostrarse con procedencias locales y parcelas de establecimiento (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.).

10.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal

10.4.1. Biología de Semillas y Germinación

La conservación de germoplasma de I. insignis no debe basarse en la afirmación no verificada de semillas “intermedias”. La fuente local disponible señala pérdida rápida de viabilidad en semillas del género y utiliza micropropagación a partir de yemas como alternativa de conservación. Para viveros se recomienda sembrar material fresco y, en paralelo, mantener protocolos in vitro o colecciones vivas de procedencias documentadas. (Villamar Flores, s. f.)

10.4.2. Propagación agámica (Vegetativa)

La micropropagación in vitro constituye una alternativa documentada localmente. El trabajo de Villamar Flores obtuvo 90 % de descontaminación y viabilidad con NaClO al 1,5 % durante 15 minutos y encontró respuesta favorable del medio MS con BAP en la fase de establecimiento. Estos datos corresponden al protocolo ensayado y deben repetirse antes de escalarse. (Villamar Flores, s. f.)

10.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

10.5.1. Criterios de Plantación Regenerativa

Las proyecciones MaxEnt bajo escenarios RCP 4.5 y 6.0 no deben emplearse como evidencia consolidada mientras procedan de una fuente no revisada por pares y carezcan de corroboración primaria. La priorización de plantación debe apoyarse en ocurrencias verificadas, clima actual, suelo, disponibilidad hídrica y ensayos de procedencia antes de inferir expansión futura del hábitat.

10.5.2. Hidrología forestal y suelos

La contribución de Inga a carbono y fertilidad debe distinguir evidencia de especie y evidencia de sistema. Los estudios de sistemas agroforestales de Imbabura y Carchi muestran capacidad de fijación de carbono a escala de arreglos productivos, pero no justifican asignar una cifra única de secuestro a I. insignis. (Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021)

10.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y Bioeconomía Escalable

10.6.1. Usos dendroenergéticos y carbono

La poda puede integrarse al reciclaje de nutrientes y al manejo de sombra. Para contabilizar carbono se deben usar inventarios y ecuaciones alométricas validadas para el arreglo local. La cifra de 8,76 Mg CO_2 ha^{-1} no debe atribuirse como tasa universal a I. insignis cuando la fuente disponible corresponde a sistemas agroforestales. (Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021)

10.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

- **Usos Culturales e Identidad:** La especie no es un mero adorno biológico; es el corazón del sistema tradicional de policultivo denominado "chakra" andina. Las comunidades indígenas (Otavalos, Kayambis) y afroecuatorianas la han cultivado intergeneracionalmente, integrándola a la agronomía de subsistencia del norte del Ecuador.
- **Usos Materiales y Dendroenergéticos**: La madera densa y fibrosa obtenida de la poda rutinaria es acopiada y utilizada masivamente como leña de alta densidad energética para la cocción de alimentos, aliviando la presión de tala sobre los frágiles relictos primarios del bosque seco.
- **Usos Alimentarios Funcionales:** El arilo suculento se consume en fresco y posee una alta demanda estacional. Sus propiedades organolépticas (dulzor extremo) garantizan la soberanía y seguridad alimentaria infantil en las periferias rurales durante las temporadas de cosecha.

- **Geoeducación y Apropiación Tecnológica:** Para preservar y difundir este legado biocultural a las nuevas generaciones, el Geoparque Imbabura ha implementado un asistente virtual (chatbot) denominado "NUNA" (alma en Kichwa). Esta plataforma instruye interactivamente sobre agricultura ecológica, geositios y saberes de la chakra, conectando la tradición botánica con la educación digital.

10.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

10.8.1. Preguntas de metacognición y debate

¿Por qué una decisión de restauración no debería basarse únicamente en una cifra de carbono, y qué variables ecológicas y sociales compararía entre especies candidatas?

Antes de proyectar cambios futuros del hábitat de I. insignis, ¿qué datos de ocurrencia, clima, suelo y validación del modelo deberían exigirse para una decisión pública?

Si la tolerancia a desecación de las semillas de Inga insignis no está suficientemente caracterizada, ¿qué experimento diseñaría para definir un protocolo de almacenamiento seguro?

10.8.2. Reto Práctico profesional

Diseño de Inventario de Carbono Agroforestal. Para una finca cafetalera de 15 ha, proponga un muestreo que permita estimar densidad arbórea, DAP, altura y biomasa de la matriz de sombra. Indique qué ecuación alométrica usaría, cómo reportaría incertidumbre y por qué no atribuiría al sistema una tasa de carbono tomada de otra parcela sin recalibración.

10.9. Referencias Bibliográficas

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). Inga insignis Kunth. *Plants of the World* Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:128550-2

Pennington, T. D. (1997). The genus Inga: Botany. *Royal Botanic Gardens*, Kew. https://shop.kew.org/the-genus-inga-botany

Villamar Flores, L. A. (s. f.). Estandarización de las etapas de micropropagación in vitro de la guaba (Inga insignis) endémica de la provincia de Imbabura. *Repositorio Ecuatoriano de Investigación* (REDI/CEDIA). https://redi.cedia.edu.ec/document/58850

Añazco-Romero, M., & Fernández-Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador. Bosques *Latitud Cero*, 11(2), 32–42. https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1089

Capítulo 11: *Spondias purpurea L.*: Propagación Vegetativa, Poscosecha y Economía Botánica de Ambuquí.

Spondias purpurea L. (Ovo / Jocote)

Figura 23.

Spondias purpurea L.



11.1. Encabezado Científico

Resumen / Abstract

Spondias purpurea posee una de las bases documentales locales más sólidas de esta serie. Macía y Barfod (2000) describieron en Ecuador su propagación, cosecha, procesamiento, rendimientos y relevancia socioeconómica; para Ambuquí registraron en 1995 una cosecha total de 130.000 kg y una ganancia neta histórica de 314 USD ha−1. Una revisión poscosecha documenta el carácter climatérico del fruto, su vida útil corta a temperatura ambiente y datos de composición nutricional. La interpretación se sustenta únicamente en evidencia pertinente a S. purpurea (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

Palabras Clave / Keywords

Spondias purpurea, Propagación vegetativa, Poscosecha, Bioeconomía, Ambuquí, Geoparque Imbabura.

11.2. Apertura Pedagógica

11.2.1. Resultados de aprendizaje (Competencias)

Diseñar sistemas agroforestales con Spondias purpurea que integren propagación vegetativa, arquitectura de copa, cosecha y manejo poscosecha.

Diseñar ensayos de establecimiento con estacas de Spondias purpurea y medir su contribución a cobertura y estabilidad del suelo antes de atribuir un efecto de conservación.

Estructurar cadenas de valor que reduzcan pérdidas poscosecha mediante procesamiento, conservación y actualización de costos y mercados.

11.2.2. Máxima filosófica / Axioma andino

"La rama que se inclina da su fruto al suelo; el árbol que se despoja de sus hojas sobrevive al fuego del sol" - Una reflexión sobre la poda de enanismo y la caducifolia, recordando que, en la austeridad del bosque seco, soltar lo superfluo es la estrategia de la vida.

11.3. LA BIOSFERA: Maquinaria biológica y ecofisiología

11.3.1. Fisiología y fenología de la especie

Spondias purpurea es un frutal tropical de marcada estacionalidad; su manejo poscosecha está condicionado por el comportamiento climatérico y la rápida pérdida de calidad del fruto a temperatura ambiente. Las fechas exactas de floración y fructificación deben reportarse por localidad y cultivar, evitando convertir calendarios locales en rasgos universales (Mohammed et al., 2019).

11.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y reproducción forestal

11.4.1. Propagación agámica (vegetativa)

La propagación vegetativa mediante estacas es una práctica documentada para S. purpurea en Ecuador y permite conservar tipos productivos seleccionados. En el caso histórico de Ambuquí, esta estrategia forma parte del sistema de cultivo descrito por Macía y Barfod (2000) (Macía & Barfod, 2000).

11.5. LA TECNOSFERA II: Restauración biocibernética y paisaje

- Criterios de Plantación Regenerativa: Poda de Enanismo. Es la intervención crítica; frena el crecimiento apical e induce un arbusto bajo, facilitando la cosecha manual ergonómica, evitando fracturas letales de ramas y promoviendo brotes laterales.
- Tipos de Silvicultura Restaurativa: Actúa como Especie Nodriza suprema y centro de reclutamiento. La caída masiva de hojas y frutos descartados forma un mantillo que retiene humedad, bajo el cual germinan especies de bosque seco.
- Hidrología Forestal y Suelos: Las estacas leñosas sembradas profundamente (20-30 cm) anclan de inmediato los aridisoles pedregosos propensos a erosión hídrica, reteniendo el complejo humus-aluminio del sustrato.
- Sistemas Integradores Agroforestales: Su mayor dominancia ecológica y valor se alcanza cuando se estructura en cercas vivas y linderos, proveyendo barreras, forraje derivado de las podas y un corredor biológico para avifauna frugívora.

11.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y bioeconomía escalable

11.6.1. Fitoquímica y bioactivos

La revisión poscosecha reporta para el fruto 74 kcal por 100 g de porción comestible y aproximadamente 48 mg de vitamina C por 100 g, además de una composición rica en carbohidratos. Estos valores corresponden al material revisado y pueden variar entre cultivares, madurez y procedencia (Mohammed et al., 2019).

11.6.2. Bioemprendimientos biobasados escalables

En Ambuquí, Macía y Barfod (2000) documentaron para 1995 un volumen total de cosecha de 130.000 kg, rendimiento medio de 3.250 kg ha−1, ingresos brutos de 472 USD ha−1 y ganancia neta de 314 USD ha−1. Son valores históricos y no deben presentarse como rentabilidad actual sin actualización de precios y

costos. La evidencia también respalda el procesamiento en mermeladas, vino y licor (Macía & Barfod, 2000).

11.6.3. Biorrefinerías de segunda generación

La corta vida poscosecha justifica cadenas de transformación que reduzcan pérdidas. La literatura documenta consumo fresco y procesamiento en mermeladas, vino y licor, mientras la revisión poscosecha identifica temperaturas de almacenamiento que prolongan la vida útil (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

11.7. LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y etnobotánica

- Usos Culturales e Identidad: La "Fiesta del Ovo" (marzo) en Ambuquí es el epicentro de la identidad social, convocando a afroecuatorianos, mestizos e indígenas. Esta festividad asegura la transferencia intergeneracional de conocimientos sobre podas, viverismo y comercialización de genotipos de élite.
- Usos Medicinales y Fitoterapéuticos: Decocciones de su corteza se usan empíricamente como antiespasmódico y febrífugo contra infecciones gastrointestinales (disentería), y las hojas como antiséptico astringente para quemaduras y sarna.
- Usos Alimentarios Funcionales: Su abundante floración estival lo consagra como pilar melífero, sosteniendo la apicultura andina, y su follaje funge como suplemento forrajero para rumiantes durante las sequías. Los frutos inmaduros agrios se integran a la gastronomía endémica sazonando caldos de carne y fréjol.

11.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

11.8.1. Conclusiones Biocibernéticas

S. purpurea conecta restauración productiva y economía local mediante un rasgo clave: puede cultivarse en sustratos rocosos y marginales y propagarse vegetativamente, mientras sus frutos sostienen cadenas de comercialización y procesamiento. El caso histórico de Ambuquí demuestra valor económico, pero

cualquier evaluación actual debe actualizar costos, rendimientos y condiciones de mercado (Macía & Barfod, 2000).

11.8.2. Preguntas de Metacognición y Debate

¿Qué evidencia económica, cultural y ambiental sería necesaria para evaluar si una festividad asociada al ovo puede contribuir responsablemente a la bioeconomía y educación del Geoparque?

¿Qué información fitosanitaria y de seguridad sería necesaria antes de recomendar cualquier intervención sobre epífitas u otros organismos asociados a S. purpurea?

¿Qué consecuencias genéticas y productivas puede tener una dependencia prolongada de propagación vegetativa, y cómo evaluaría diversidad entre árboles madre de S. purpurea?

11.8.3. Reto Práctico Profesional

Bioeconomía y Reducción de Pérdidas. Diseñe el flujo logístico para comercializar 500 kg de ovo desde Ambuquí. Compare al menos dos alternativas de empaque y conservación mediante criterios de pérdida poscosecha, inocuidad, costo, huella material y disponibilidad local, evitando declarar “cero residuos” sin un balance verificable.

11.9. Referencias Bibliográficas

Macía, M. J., & Barfod, A. S. (2000). Economic botany of Spondias purpurea (Anacardiaceae) in Ecuador. *Economic Botany*, 54(4), 449–458. https://doi.org/10.1007/BF02866544

Mohammed, M., Bridgemohan, P., Graham, O., Wickham, L., Bridgemohan, R. S. H., & Mohammed, Z. (2019). Postharvest Physiology, Biochemistry and Quality Management of Chili Plum (Spondias purpurea var. Lutea): A Review. *Journal of Food Research*, 8(3), 1–15. https://doi.org/10.5539/jfr.v8n3p1

Capítulo 12: *Cynophalla didymobotrys* (Ruiz & Pav. ex DC.) *Cornejo & Iltis*: Taxonomía, Afinidades Climáticas y Agenda de Restauración en el Geoparque Imbabura.

Cynophalla didymobotrys (Ruiz & Pav. ex DC.) *Cornejo & Iltis* (Quebrajacho)

Figura 24.

Taxonomía, afinidades climáticas y restauración con enfoque precautorio



12.1. Encabezado Científico

12.1.1. Resumen / Abstract

Cynophalla didymobotrys está respaldada taxonómicamente como combinación válida para la Flora del Ecuador. La evidencia disponible también permite situarla dentro de los patrones climáticos de Capparaceae neotropicales y confirmar registros botánicos en Ecuador. Sin embargo, la evidencia disponible no ofrece respaldo suficientemente robusto para presentar como hechos establecidos su categoría “En Peligro”, la obligatoriedad de semillas recalcitrantes, valores micrométricos de nectarios, concentraciones de néctar o el uso específico de su madera en la Bomba del Chota. Esas cuestiones deben abordarse como

prioridades de investigación etnobotánica y silvicultural (Cornejo & Iltis, 2006; Mercado Gómez et al., 2020; INABIO, s. f.).

Palabras Clave / Keywords

Cynophalla didymobotrys, Capparaceae, Taxonomía, Propagación experimental, Etnobotánica, Geoparque Imbabura.

12.2. Apertura Pedagógica

12.2.1. Resultados de Aprendizaje (Competencias)

Distinguir la nomenclatura y los caracteres taxonómicos de Cynophalla didymobotrys utilizando fuentes botánicas trazables.

Diseñar ensayos ex situ para caracterizar germinación, tolerancia a desecación y almacenamiento de semillas de Cynophalla didymobotrys antes de fijar un protocolo.

Diseñar una investigación de campo que determine si Cynophalla didymobotrys presenta interacciones planta–hormigas relevantes para control biológico y bajo qué condiciones.

12.2.2. Máxima Filosófica / axioma andino

"Cuando la evidencia es incompleta, la primera tarea de restauración es medir, documentar y escuchar antes de intervenir" - Una analogía biocibernética sobre la resiliencia del quebrajacho y el pueblo afroecuatoriano, ambos forjados en la adversidad del Valle del Chota.

12.3.LA BIOSFERA: Maquinaria Biológica y Ecofisiología

12.3.1. Dendrología y morfología

Cynophalla didymobotrys es una combinación taxonómica válida publicada para la Flora del Ecuador dentro de Capparaceae. Solo deben emplearse como diagnósticos los caracteres y la nomenclatura sustentados en fuentes taxonómicas trazables; descripciones anatómicas finas, defensas cristalinas y comparaciones con otros géneros se consideran temas que requieren una monografía o revisión morfológica específica antes de presentarse como diagnósticos de la especie (Cornejo & Iltis, 2006).

12.3.2. Ecofisiología y Respuesta al Estrés

Los análisis comparativos de Capparaceae neotropicales muestran afinidades climáticas y conservadurismo filogenético a escala de linaje, pero no permiten asignar a C. didymobotrys una historia ecofisiológica detallada del Mioceno sin evidencia específica. Para el Geoparque se propone caracterizar tolerancia hídrica, fenología y rasgos foliares de poblaciones locales antes de utilizarlos como criterios de diseño (Mercado Gómez et al., 2020).

12.3.3. Anatomía de la Madera y Xilema

La dureza y anatomía de la madera de C. didymobotrys requieren una fuente xilológica específica antes de relacionarlas cuantitativamente con resistencia a cavitación. Las inferencias hidráulicas no verificadas deben evitarse; se mantiene como línea de investigación la caracterización anatómica de vasos, fibras y densidad básica en procedencias de Imbabura.

12.4. LA TECNOSFERA I: Silvicultura y Reproducción Forestal

12.4.1. Biología de Semillas y Germinación

La biología de semillas de C. didymobotrys debe considerarse un vacío de información operativo. La recalcitrancia estricta y la prohibición de almacenamiento no deben asumirse sin un estudio primario específico. Un programa de vivero debe ensayar contenido de humedad, tolerancia a desecación, temperatura y tiempo de almacenamiento antes de establecer un protocolo definitivo.

12.4.2. Inoculación Simbiótica

No se prescribe una co-inoculación microbiológica obligatoria sin evidencia específica de la especie. Se propone comparar sustrato local no esterilizado, inoculantes micorrícicos nativos y controles estandarizados, midiendo supervivencia, biomasa y estado nutricional.

12.5.LA TECNOSFERA II: Restauración Biocibernética y Paisaje

12.5.1. Tipos de Silvicultura Restaurativa

La nucleación con C. didymobotrys es una hipótesis de restauración plausible que debe probarse. El diseño experimental debe medir sombra, humedad, reclutamiento de otras especies y supervivencia de brinzales frente a controles, evitando asumir de antemano un efecto de “planta nodriza”.

12.5.2. Hidrología Forestal y Control Biológico

Los nectarios extraflorales y las interacciones planta–hormiga son rasgos relevantes en Capparaceae, pero los valores de tamaño de nectarios, porcentaje de carbohidratos y géneros de hormigas no deben tratarse como datos específicos de C. didymobotrys sin una fuente primaria inequívoca. Estos parámetros deben inventariarse localmente antes de diseñar control biológico asociado.

12.6. LA TECNOSFERA III: Biorrefinerías y Bioeconomía Escalable

- Fitoquímica y Bioactivos: Las hojas concentran oxalato de calcio en drusas cristalinas (biomineralización) como defensa pasiva anti-masticadores, y los receptáculos florales exudan néctar carbohidratado constante.
- Bioemprendimientos Biobasados Escalables (PFNM): Las semillas y elementos vegetativos de los árboles endémicos del bosque seco son insumos directos para la micro-economía artesanal de las mujeres afroecuatorianas, quienes las transforman en bisutería, collares y ornamentos para el geoturismo local.
- Biorrefinerías de Segunda Generación y Cero Residuos: La madera muerta o los remanentes de las podas fitosanitarias pueden derivarse hacia el tallado artesanal o la producción dendroenergética controlada, evitando desperdicios de un recurso maderable tan duro y escaso.
- Usos Dendroenergéticos y Carbono: Al retener hojas todo el año (perennifolio), es un sumidero de carbono ininterrumpido en el bosque

seco, manteniendo activos los flujos fotosintéticos cuando las especies caducifolias entran en senescencia estival.

12.7.LA SOCIOSFERA: Bioculturalidad y Etnobotánica

12.7.1. La Bomba del Chota

La Bomba del Chota constituye patrimonio cultural fundamental del territorio; sin embargo, la documentación etnobotánica disponible no es suficiente para afirmar que C. didymobotrys sea una madera indispensable para la fabricación de sus tambores. La relación se conserva como pregunta de investigación: identificar botánicamente las maderas utilizadas por artesanos, documentar preferencias y evaluar la sostenibilidad de su abastecimiento.

12.7.2. Justicia Espacial y Geoturismo

La conservación de C. didymobotrys merece monitoreo y propagación precautoria, pero no debe asignarse una categoría de amenaza “EN” sin una ficha oficial vigente y específica que la sustente. La prioridad operativa es documentar distribución, abundancia, regeneración y presiones locales, y actualizar el diagnóstico con la autoridad o lista roja pertinente.

12.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

12.8.1. Conclusiones Biocibernéticas

El principal aporte de C. didymobotrys a esta obra es mostrar cómo la integridad científica también es una forma de manejo adaptativo: la taxonomía y la ocurrencia pueden verificarse, mientras varios rasgos silviculturales y bioculturales requieren investigación específica. El capítulo convierte esas incertidumbres en una agenda explícita de inventario, propagación, ecofisiología y etnobotánica, evitando transformar hipótesis atractivas en hechos no demostrados (Cornejo & Iltis, 2006; Mercado Gómez et al., 2020; INABIO, s. f.).

12.8.2. Preguntas de Metacognición y Debate

¿Cómo diseñaría un experimento para determinar tolerancia a desecación y tiempo de almacenamiento de semillas de C. didymobotrys, y cómo cambiarían los resultados la logística de un programa de restauración?

¿Qué caracteres y fuentes taxonómicas deberían revisarse para justificar la delimitación de Cynophalla didymobotrys frente a tratamientos alternativos del grupo?

Si se confirma la presencia y función de nectarios extraflorales en poblaciones locales, ¿cómo diseñaría un estudio para medir su relación con hormigas, herbivoría y rendimiento de un cultivo asociado antes de valorarlo como servicio ecosistémico?

12.8.3. Reto Práctico Profesional

Estructuración de un Vivero Experimental. Elabore un Manual Operativo Estándar para C. didymobotrys que incluya tratamientos comparativos de humedad, almacenamiento y sustrato, criterios de bioseguridad, registros de supervivencia y una regla para actualizar el protocolo cuando los datos contradigan la hipótesis inicial.

12.9. Referencias Bibliográficas

Cornejo, X., & Iltis, H. H. (2006). New combinations in Capparaceae sensu stricto for Flora of Ecuador. *Harvard Papers in Botany,* 11(1), 17–18. https://doi.org/10.3100/1043-4534(2006)11[17:NCICSS]2.0.CO;2

Mercado Gómez, J. D., Prieto-Torres, D. A., & Rojas-Soto, O. (2020). Climatic affinities of Neotropical species of Capparaceae*. Botanical Journal of the Linnean Society*, 193(2), 263–275. https://doi.org/10.1093/botlinnean/boz092

Instituto Nacional de Biodiversidad del Ecuador (INABIO). (s. f.). Registros botánicos de Cynophalla didymobotrys en Ecuador. *Base de datos institucional.* Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://bndb.sisbioecuador.bio/bndb/species/347854

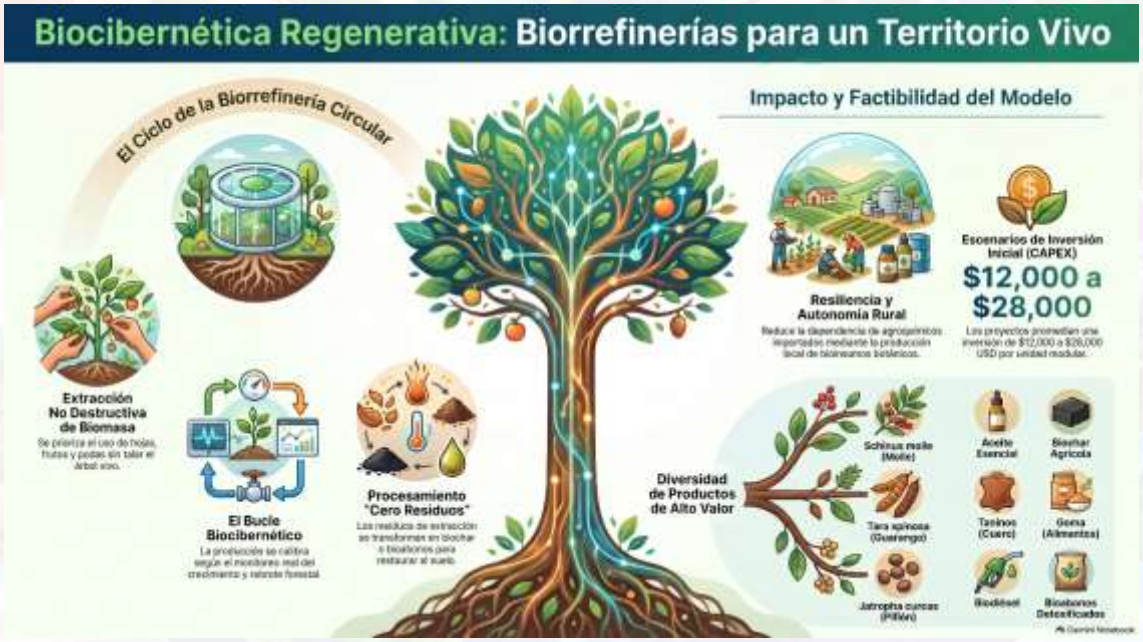
HACIA UNA BIOCIBERNÉTICA REGENERATIVA

Sistemas Socioecológicos, Desarrollo Regenerativo y Restauración de Territorios Vivos

PARTE III

APLICACIÓN BIOCIBERNÉTICA IN SITU

12 perfiles de proyectos biobasados escalables · Edición científica auditada para editorial e imprenta



Alcance De La Parte III

Esta Parte III convierte la base conceptual de la biocibernética regenerativa y la caracterización científica de las especies en una cartera de perfiles de proyecto. Los perfiles se publican como instrumentos de diseño y prefactibilidad: no equivalen a proyectos ejecutados, estudios de factibilidad, registros sanitarios, permisos ambientales ni estudios de mercado concluidos.

Regla de integridad científica

Una afirmación específica se mantiene como hecho únicamente cuando puede vincularse con una fuente científica o institucional identificable. Cuando la literatura disponible no sustenta una cifra, una función ecológica, un uso biocultural o una proyección comercial local, el texto la presenta como hipótesis, meta de proyecto o variable que debe validarse.

Los marcadores internos de citación del borrador fueron eliminados. En su lugar se emplean citas autor–año y, en cada capítulo, una bibliografía con DOI o enlace institucional/editorial activo. Para asegurar trazabilidad, cada referencia retenida es citada explícitamente en el capítulo correspondiente.

Los apartados financieros conservan las cifras CAPEX/OPEX/ventas del borrador únicamente como supuestos de escenario. No se presentan VAN, TIR o B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no incorporan un flujo anual completo y reproducible. La fase de prefactibilidad deberá recalcularlos con cotizaciones, rendimientos de proceso, capital de trabajo, impuestos, contingencias y sensibilidad.

La arquitectura editorial común se mantiene en ocho subsecciones por perfil: identificación y mercado; análisis estructural; marco lógico; ingeniería y bucle biocibernético; evaluación financiera; modelos económicos y derechos; matriz de impactos; y cierre analítico/pedagógico.

Lectura de evidencia

Evidencia publicada = cita autor–año + referencia verificable. Hipótesis territorial = propuesta que exige medición local. Meta/indicador = compromiso de diseño, no resultado observado. Escenario financiero = supuesto de prefactibilidad, no cotización ni promesa de rentabilidad.

Capítulo 1: *Schinus molle L.* (Molle)



***Schinus molle L.* (Molle)**

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Olvera-Licona et al., 2021; Scalvenzi et al., 2024).

1.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Biorrefinería Modular de Aceites Esenciales y Biochar a partir de Schinus molle para la Restauración Biocibernética en el Corredor Ambuquí-Salinas.

- **Matriz de Priorización de Alternativas:**

La selección de Schinus molle frente a opciones extractivas maderables se justifica técnicamente por la abundancia de su follaje y frutos (fuentes de aceites esenciales) que pueden aprovecharse mediante podas sin talar el árbol. Ambientalmente, su uso en restauración debe considerarse una hipótesis territorial a validar mediante supervivencia, cobertura, suelo y competencia, sin inferir funciones universales a partir de la especie. Socialmente, el procesamiento local de biopesticidas naturales reduce la dependencia campesina de agroquímicos importados (Scalvenzi et al., 2024; Olvera-Licona et al., 2021).

- **Hipótesis de mercado y validación comercial:**

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. La disponibilidad local de S. molle deberá cuantificarse mediante inventario de oferta antes de dimensionar la planta. Los segmentos objetivo considerados se concentran en la agroecología regional, requiriendo biopesticidas botánicos, y en la industria de la cosmética natural que valora el perfil terpénico del aceite esencial de molle (Scalvenzi et al., 2024).

- **Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):**

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. el borrador propone un volumen mínimo de producción de 120 litros de aceite esencial anuales y 5 toneladas de biochar para cubrir los costos fijos (operación de alambiques, jornales de poda y destilación) y costos variables.

1.1.1. Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

1.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

- Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base:

- Problema Central: Alta dependencia de insumos agroquímicos externos y degradación severa de los suelos en el valle interandino.

- Causas: Monocultivos extractivos, pérdida de cobertura vegetal nativa, desconocimiento del valor fitoquímico de las especies locales.

- Efectos: Pérdida de rentabilidad rural, desertificación, migración juvenil y pérdida de saberes etnobotánicos.

- Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:

- Objetivo Central: Establecimiento de una cadena de valor biobasada y regenerativa a partir de S. molle.

- Medios: Instalación de biorrefinerías modulares comunitarias, capacitación en podas de formación, aprovechamiento de podas para destilación.

- Fines: Suelos restaurados mediante biochar, autonomía en bioinsumos, incremento de ingresos familiares.

1.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

Tabla 4.

Los Indicadores Y Metas

Nivel Lógico	Resumen Narrativo	Indicadores Verificables (IOV)	Supuestos
Fin	Mejorar la resiliencia socioecológica del Geoparque Imbabura mediante el Desarrollo Regenerativo.	Meta propuesta: incremento del 15% en el índice de resiliencia territorial al año 5.	Estabilidad en políticas públicas de conservación.
Propósito	Biorrefinería comunitaria de S. molle operando con rentabilidad y bajo enfoque de "cero residuos" como objetivo de diseño.	1 planta extractiva operativa y meta de valorización trazable de la biomasa residual, cuya fracción a biochar se definirá por balance de masa al mes 18.	La comunidad mantiene el acuerdo de cogestión.
Componentes	1. Planta de destilación instalada. 2. Red de podadores capacitada.	1 alambique de 500L instalado. 30 comuneros certificados.	Disponibilidad tecnológica local.
Actividades	1.1 Adquisición de equipos. 2.1 Talleres de silvicultura biocibernética.	Ejecución del 100% del presupuesto CAPEX/OPEX asignado.	Clima permite las jornadas de poda.

1.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

- Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-:

La biocibernética territorial exige que la extracción no supere la tasa de regeneración del ecosistema. El bucle se cierra midiendo el volumen de biomasa foliar extraído y vinculando este límite a la capacidad de la especie para rebrotar sin comprometer su función de sombra y retención de suelo. No se adopta un porcentaje universal de extracción de copa: el umbral deberá definirse con ensayos de poda, rebrote y seguimiento de vigor, fenología y estabilidad del árbol.

- Flujo conceptual de procesos (Biorrefinería):

1. Acopio: Recolección controlada de hojas y frutos de S. molle.
2. Extracción: Hidrodestilación por arrastre de vapor (obtención de aceite esencial y biopesticidas orgánicos).
3. Valorización del Residuo: Secado de la biomasa extraída.
4. Pirólisis: Termoconversión de la biomasa residual en Biochar (carbón vegetal poroso).

Figura 1. Retorno: Inyección del biochar al suelo de los rodales, cerrando el ciclo (Scalvenzi et al., 2024).

- Requerimientos Tecnológicos:

Destiladores modulares de acero inoxidable, sensores IoT para monitorear temperaturas de destilación y hornos de pirólisis tipo retortas de baja emisión.

1.5. Evaluación Financiera y Económica

- Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores referenciales):

- Inversión Inicial (CAPEX): $15,000 USD (Alambique, horno pirolítico, sensores).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $6,500 USD (Jornales, energía, mantenimiento).

- Proyección de Ventas (Anual): Venta de aceites esenciales (biopesticidas) y biochar agrícola estimada en $14,000 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

- Indicadores financieros para recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

- Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

1.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

- Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Se propone controlarlo mediante monitoreo y umbrales adaptativos. La extracción fitoquímica no requiere talar el árbol, respetando la capacidad de carga del bosque seco.

- Piso Social: Creación de empleos justos y acceso a bioinsumos locales que reducen el endeudamiento campesino, con potencial de reducir el uso de ciertos

insumos sintéticos, condicionado a eficacia, selectividad, regulación y evaluación de riesgo.

- Economía Circular:

El diseño es de "cero residuos" como objetivo de diseño. El hidrolato y la biomasa agotada se consideran corrientes a valorizar; cualquier uso agrícola del hidrolato requiere caracterización química y pruebas de fitotoxicidad, mientras que la producción y aplicación de biochar deberá documentar temperatura de pirólisis, rendimiento y calidad del material.

- Género y Generacional:

Se prioriza la participación de mujeres emprendedoras afroecuatorianas en la fase de refinamiento y valorización aromática, mientras que los jóvenes se integran al monitoreo tecnológico (sensores) y aplicación de saberes ancestrales sobre los ciclos lunares de poda.

1.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

Tabla 5.

Efectos esperados y constituyen

Impacto Ambiental	Impacto Social	Impacto Económico
Potencial de almacenamiento de carbono mediante biochar, sujeto a balance de masa, estabilidad del material y monitoreo del suelo.	Fortalecimiento de la organización comunitaria (Minga) para la recolección.	Generación de una nueva fuente de ingresos directos y estables.
Preservación de la cobertura vegetal al fomentar el valor del árbol vivo.	Rescate de la memoria etnobotánica vinculada al uso curativo del molle.	Reducción en la fuga de capitales por compra de agroquímicos externos.

Desarrollo de biopesticidas cuya eficacia y selectividad deberán evaluarse; no se asume ausencia de efectos sobre polinizadores u organismos no objetivo.	Mejora en la salud ocupacional del agricultor al evitar tóxicos.	Rentabilidad a validar con flujo de caja reproducible y análisis de sensibilidad.

1.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

- Conclusiones del Perfil:

La Biorrefinería de Schinus molle plantea una intervención técnicamente plausible cuya factibilidad y rentabilidad deben demostrarse en prefactibilidad. Representa la transición empírica hacia el Desarrollo Regenerativo, utilizando la biocibernética para modular la extracción, transformando un PFNM en bioinsumos y biochar que rehabilitan la resiliencia del Geoparque Imbabura.

- Preguntas de Metacognición y Debate:

1. Si la demanda del mercado internacional de biopesticidas de molle excede la oferta local, ¿qué regulaciones biocibernéticas deben aplicarse para evitar la sobreexplotación de la biomasa?
2. ¿Cómo justificaría ante un tomador de decisiones la inversión en una planta de biochar en lugar de fertilizantes NPK convencionales, desde la perspectiva de la Economía de la Dona?

- Reto Práctico Profesional:

Actualización del Marco Lógico: Modifique el componente de 'Capacitación comunitaria' en la MML para incluir un indicador medible sobre equidad de género en el procesamiento del aceite esencial, definiendo su medio de verificación.

1.9. Referencias Bibliográficas

Olvera-Licona, G., Machuca, R., Borja, A., Corona, A., Zaragoza, I., Arreola, J. G., & Jiménez, J. (2021). *Xilotecnia de la madera de Schinus molle L*. de

una plantación forestal comercial en Hidalgo, México. *Madera y Bosques,* 27(1), e2711567. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2711567

Scalvenzi, L., Durofil, A., Cáceres Claros, C., Pérez Martínez, A., Guardado Yordi, E., Manfredini, S., Baldini, E., Vertuani, S., & Radice, M. (2024). Unleashing Nature's Pesticide: A Systematic Review of Schinus molle Essential Oil's Biopesticidal Potential. *Sustainability,* 16(23), 10444. https://doi.org/10.3390/su162310444

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 2: *Tara spinosa* (Molina) *Britton & Rose* (Guarango / Tara)



***Tara spinosa* (Molina) *Britton & Rose* (Guarango / Tara)**

- **Base científica.**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Murga-Orrillo et al., 2023; Sangay et al., 2017; Cordero et al., 2016; Ibieta et al., 2023; Chambi et al., 2013).

2.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Biorrefinería Modular de Taninos y Galactomananos a partir de Tara spinosa en Sistemas Agroforestales del Geoparque Imbabura.

- **Matriz de Priorización de Alternativas:**

La elección de Tara spinosa (sin. Caesalpinia spinosa) se fundamenta en su alto valor como Producto Forestal No Maderable (PFNM). A nivel ecológico, promueve la restauración mediante asociaciones micorrícicas arbusculares que favorecen el crecimiento en suelos degradados. A nivel técnico, la extracción no destructiva de vainas asegura la permanencia de la cobertura vegetal, priorizando un modelo biobasado frente a la explotación maderera (Sangay et al., 2017; Murga-Orrillo et al., 2023; Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.).

- **Hipótesis de mercado y validación comercial:**

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. El perfil identifica como segmentos industriales objetivo por la goma de tara (galactomananos extraídos del endospermo) como espesante y estabilizante alimentario, y por los polifenoles/taninos (extraídos de las valvas) para uso antioxidante y en curtiembres. La oferta en Imbabura puede estructurarse aprovechando la variación productiva ligada al gradiente altitudinal andino (Ibieta et al., 2023; Chambi et al., 2013; Murga-Orrillo et al., 2023).

- **Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar**):

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. El borrador propone un volumen mínimo de procesamiento de 5 toneladas métricas anuales de vainas maduras para sostener los costos fijos (maquinaria de trituración, separación neumática y extracción acuosa) y generar márgenes positivos para las asociaciones comunitarias.

- **Puerta de validación comercial**

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

2.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

- Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-

- Problema Central: Pérdida de rentabilidad rural y degradación de los suelos del bosque seco interandino.

- Causas: Dependencia de cultivos de ciclo corto, abandono de prácticas agroforestales, incomprensión del valor económico de las especies leñosas nativas.

- Efectos: Erosión del suelo, pérdida de agrobiodiversidad, y vulnerabilidad socioeconómica frente al cambio climático.

- Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:

- Objetivo Central: Establecimiento de una cadena de valor biobasada y regenerativa anclada en el manejo agroforestal de T. spinosa.

- Medios: Diseño de biorrefinerías de "cero residuos" como objetivo de diseño que segreguen gomas y taninos, establecimiento de parcelas agroforestales con inoculación micorrícica.

- Fines: Incremento de la resiliencia climática del paisaje, diversificación de ingresos rurales y conservación del germoplasma local. (Sangay et al., 2017; Ibieta et al., 2023; Chambi et al., 2013)

2.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• **Fin:** Impactar positivamente la resiliencia socioecológica del Geoparque Imbabura mediante un desarrollo regenerativo medible.

• **Propósito:** Biorrefinería modular descentralizada operando con estricta trazabilidad de materia prima y métricas de "cero residuos" como objetivo de diseño.

• **Componentes:** 1. Centro de acopio y trituración mecánica instalado. 2. Protocolos de inoculación en vivero estandarizados. 3. Comuneros capacitados en podas y cosecha.

• **Actividades:** Adquisición de trituradoras y tamices neumáticos; recolección de semillas y escarificación mecánica; talleres de manejo agroforestal.

• **Indicadores Objetivamente Verificables (IOV):** Toneladas de galactomananos y extractos polifenólicos producidos por semestre; número de hectáreas bajo manejo agroforestal con T. spinosa.

• **Supuestos y Riesgos**: Variabilidad interanual de precipitación y temperatura que afecte la fenología y la productividad de vainas. (Murga-Orrillo et al., 2023)

2.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

- Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-:

La producción de vainas de T. spinosa varía fuertemente con la altitud y las condiciones edafoclimáticas. El bucle biocibernético exige que el acopio de la biorrefinería se acople a la productividad local medida, evitando establecer cuotas de mercado artificiales que inciten a la sobreexplotación. (Murga-Orrillo et al., 2023)

- Flujo conceptual de procesos (Biorrefinería):
    1. Acopio y Secado: Recepción de vainas enteras.
    2. Separación Mecánica: Desgarrado de la vaina para segregar las semillas de las valvas.
    3. Ruta A (Valvas): Molienda y extracción acuosa para la obtención de polifenoles y taninos.
    4. Ruta B (Semillas): Tostado leve, decorticación y molienda del endospermo para aislar la goma de tara (galactomananos).
    5. Cero Residuos: El germen y los residuos lignocelulósicos se caracterizan antes de cualquier uso; la alimentación animal solo se considerará si composición, inocuidad y regulación lo permiten. (Ibieta et al., 2023; Chambi et al., 2013; Murga-Orrillo et al., 2023).
- Requerimientos Tecnológicos:

Molinos de martillos, ciclones separadores, reactores de acero inoxidable para extracción por solventes (agua/etanol), y equipos de secado por aspersión (spray drying).

2.5. Evaluación Financiera y Económica

- Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales):

- Inversión Inicial (CAPEX): $22,000 USD (Molinos, tamices vibratorios, extractores).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $8,500 USD (Mantenimiento, energía, logística de acopio, jornales).

- Proyección de Ventas (Anual): Venta de harina de tara y goma cruda estimada en $18,000 USD, con precios indexados al mercado internacional.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

- Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

- Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

2.6. Modelos Económicos Alternativos Y Enfoque De Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

- Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Dado que T. spinosa es una especie no nodulante, su inserción agroforestal debe complementarse con manejos que mantengan el ciclo de nutrientes locales (micorrizas) sin extraer más biomasa de la que el ambiente andino repone.

- Piso Social: Formalización del trabajo agrícola, ofreciendo ingresos justos a los recolectores de vainas y diversificando la matriz económica local (Sangay et al., 2017; Cordero et al., 2016; Murga-Orrillo et al., 2023).

- Economía Circular:

Aplicación del principio de cascada, valorizando primero las fracciones de alto valor (polifenoles y galactomananos) y derivando los subproductos hacia fertilizantes orgánicos auditados (Ibieta et al., 2023; Chambi et al., 2013).

- Género, Inclusión y Generacional:

Liderazgo femenino en la clasificación de semillas y control de calidad en la planta de proceso. Integración de jóvenes técnicos para la calibración de la maquinaria y trazabilidad digital del producto.

2.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

- Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Fomento de la agrobiodiversidad, mejora del microclima mediante el establecimiento de sombra agroforestal, e interacciones edáficas beneficiosas mediadas por hongos micorrízicos orbiculares (Sangay et al., 2017).

- Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Consolidación de cooperativas de trabajo, empoderamiento tecnológico de comunidades campesinas e indígenas, y freno a la migración rural.

- Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Transformación de materia prima en origen (evitando vender el PFNM a granel), captación del margen de valor agregado y aumento de la renta neta por hectárea.

2.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

- **Conclusiones del Perfil:**

La biorrefinería basada en Tara spinosa materializa la bioeconomía regenerativa. Al entender que la especie no es nodulante, la intervención cibernética se centra en su potencial como productora de PFNM de alto valor industrial (gomas y taninos) y su manejo mediante micorrizas, garantizando un desarrollo sustentado

en ciencia auditable y no en supuestos universales (Sangay et al., 2017; Cordero et al., 2016; Ibieta et al., 2023; Chambi et al., 2013).

- **Preguntas de Metacognición y Debate:**

1. Si la productividad de vainas, taninos y goma cambia con el gradiente edafoclimático, ¿qué variables debería medir un decisor antes de zonificar plantaciones de conservación y producción?
2. ¿Cómo se garantizaría que la alta demanda de la industria alimentaria por galactomananos no induzca a un monocultivo de T. spinosa que rompa la resiliencia del ecosistema? (Ibieta et al., 2023; Chambi et al., 2013; Murga-Orrillo et al., 2023).

- **Reto Práctico Profesional:**

Diseño de Biorrefinería Modular: Elabore un flujograma conceptual (diagrama de bloques) para procesar una tonelada de vainas de guarango del Valle del Chota. Especifique qué insumo final obtendrá de la valva, del endospermo y del germen de la semilla, y asigne una aplicación industrial o social a cada uno (Murga-Orrillo et al., 2023).

2.9. Referencias Bibliográficas

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). Tara spinosa (Molina) Britton & Rose. *Plants of the World Online*. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/249443-2

Murga-Orrillo, H., Lobo, F. de A., Amorim, R. S. S., Dionisio, L. F. S., Nuñez Bustamante, E., Chu-Koo, F. W., Arévalo López, L. A., Arévalo-Hernández, C. O., & Abanto-Rodriguez, C. (2023). Increased Production of Tara (Caesalpinia spinosa) by Edaphoclimatic Variation in the Altitudinal *Gradient of the Peruvian Andes. Agronomy*, 13(3), 646. https://doi.org/10.3390/agronomy13030646

Sangay, S., Sanguin, H., Tournier, E., Thioulouse, J., Prin, Y., & Duponnois, R. (2017). Impacto de la simbiosis micorrítica arbuscular en el crecimiento temprano del cultivo de tara [Caesalpinia spinosa (Molina) Kuntze]. *Revista Forestal del Perú*, 32(2), 89–96. https://doi.org/10.21704/rfp.v32i2.1040

Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M. M., Rincón, A., & Pueyo, J. J. (2016). Rhizobial diversity, symbiotic effectiveness and structure of nodules of Vachellia macracantha. *Soil Biology and Biochemistry,* 96, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.011

Ibieta, G., Bustos, A.-S., Ortiz-Sempértegui, J., Linares-Pastén, J. A., & Peñarrieta, J. M. (2023). Molecular characterization of a galactomannan extracted from Tara (Caesalpinia spinosa) seeds. *Scientific Reports*, 13, 21893. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49149-3

Chambi, F., Chirinos, R., Pedreschi, R., Betalleluz-Pallardel, I., Debaste, F., & Campos, D. (2013). Antioxidant potential of hydrolyzed polyphenolic extracts from tara (Caesalpinia spinosa) pods. *Industrial Crops* and Products, 47, 168–175. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.03.009

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 3: *Vachellia macracantha* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) *Seigler & Ebinger* (Faique / Espino)



Vachellia macracantha (Humb. & Bonpl. ex Willd.) *Seigler & Ebinger* (Faique / Espino)

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Peña & Bräuning, 2026; Maldonado-Arciniegas et al., 2018; Cordero et al., 2016)

3.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Manejo Silvopastoril y Producción Dendroenergética Sostenible a partir de Vachellia macracantha en el Geoparque Imbabura.

- **Matriz de Priorización de Alternativas:**

La selección técnica se justifica por la capacidad del faique para establecer simbiosis nodulante con cepas de Ensifer y Rhizobium, lo que facilita la recuperación de suelos en el bosque seco andino. Ambientalmente, su posible función como especie nodriza y fuente forrajera debe cuantificarse localmente antes de incorporarla como supuesto de manejo. Socialmente, legalizar su aprovechamiento dendroenergético mediante rotación corta mitiga conflictos comunitarios (Cordero et al., 2016; Peña & Bräuning, 2026).

- **Hipótesis de mercado y validación comercial:**

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. Mercado potencial local insatisfecha de forraje proteico durante los meses de estiaje y demanda constante de carbón vegetal para consumo doméstico y gastronómico en la región.

- **Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):**

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. El borrador propone como escala inicial el procesamiento y comercialización de

8 toneladas métricas anuales de biomasa leñosa (obtenida de podas y raleos, no de tala rasa) para cubrir costos de operación de hornos eficientes tipo retorta y el mantenimiento de las parcelas silvopastoriles.

3.1.1. Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

3.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

- **Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-**

- Problema Central: Alta presión extractiva ilegal sobre relictos de V. macracantha para carbón vegetal y pérdida de cobertura forestal por sobrepastoreo.

- Causas Directas: Carencia de alternativas dendroenergéticas planificadas, escasez de forraje en estiaje y baja adopción de técnicas de escarificación mecánica en viveros locales.

- Efectos: Degradación de suelos, pérdida potencial de funciones de facilitación ecológica que el proyecto deberá medir y vulnerabilidad socioeconómica del campesinado afroecuatoriano (Maldonado-Arciniegas et al., 2018; Peña & Bräuning, 2026).

- **Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:**

- Objetivo Central: Establecimiento de un sistema agroforestal regenerativo que garantice el abastecimiento sostenible de dendroenergía y forraje.

- Medios: Implementación de viveros comunitarios con escarificación mecánica, inoculación rizobial verificada y sistemas silvopastoriles de rotación.

- Fines: Suelos estabilizados, reducción de la tala ilegal y mejora de la rentabilidad rural (Maldonado-Arciniegas et al., 2018; Peña & Bräuning, 2026).

3.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• **Fin:** Aumentar la resiliencia socioecológica del bosque seco andino en el Geoparque Imbabura mediante el Desarrollo Regenerativo.

• **Propósito:** Parcelas silvopastoriles y dendroenergéticas de V. macracantha manejadas comunitariamente con indicadores biocibernéticos.

• **Componentes (Resultados):** 1. Vivero forestal biocultural operativo aplicando escarificación mecánica. 2. Nódulos radiculares efectivos desarrollados mediante cepas locales de Rhizobium. 3. Plan de podas rotativas establecido (Cordero et al., 2016; Maldonado-Arciniegas et al., 2018).

• **Actividades:** Recolección local de semillas; ensayos de escarificación física; monitoreo dendroclimático para prever años secos; instalación de hornos eficientes de carbonización (Maldonado-Arciniegas et al., 2018; Peña & Bräuning, 2026).

• **Indicadores Objetivamente Verificables (IOV):** Porcentaje de germinación en vivero (meta local definida frente a un control sin tratamiento); volumen anual de leña/carbón extraído bajo plan de manejo (Maldonado-Arciniegas et al., 2018).

• **Supuestos y Riesgos:** Las señales dendroclimáticas (anillos de crecimiento) se ven alteradas por anomalías térmicas impredecibles que dificultan la planificación de siembras (Peña & Bräuning, 2026).

3.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

- Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-:

El aprovechamiento de la biomasa se condiciona estrictamente al monitoreo dendroclimático; las podas se planifican evaluando la sensibilidad climática de los anillos de crecimiento y las variables de los vasos de la xilema (ej. ancho de anillo) frente a las precipitaciones locales. (Peña & Bräuning, 2026)

- **Flujo conceptual de procesos (Dendroenergía y Forraje):**
  1. Propagación: Semillas tratadas con abrasión mecánica (descartando ácidos por toxicidad).
  2. Inoculación: Aplicación de cepas validadas de Ensifer y Rhizobium en sustrato.
  3. Plantación: Sincronizada con pronósticos climáticos de humedad.
  4. Aprovechamiento en Cascada: El ramaje menor se evalúa bromatológica y toxicológicamente antes de destinarse a forraje animal; las ramas leñosas estructurales se someten a pirólisis para carbón vegetal de alto rendimiento.
  5. Cero Residuos: Las cenizas y el polvo de carbón se caracterizan antes de cualquier uso como enmienda, evitando cambios no controlados de pH o salinidad del sustrato. (Cordero et al., 2016; Maldonado-Arciniegas et al., 2018; Peña & Bräuning, 2026)
- **Requerimientos Tecnológicos:** Escarificadoras mecánicas de tambor rotativo, barrenos de Pressler (para monitoreo dendrocronológico) y hornos metálicos de pirólisis de baja emisión de humo.

3.5. Evaluación Financiera y Económica

- Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales):

- Inversión Inicial (CAPEX): $12,000 USD (Hornos eficientes, herramientas de poda, infraestructura de vivero).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $5,500 USD (Mano de obra para escarificación, mantenimiento de parcelas silvopastoriles).

- Proyección de Ventas (Anual): Ingresos diversificados por venta legal de carbón vegetal empacado y reducción de costos por sustitución de forraje externo, estimados en $11,500 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

- Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

- Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

3.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

- Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: La extracción no debe superar la biomasa generada localmente, validada mediante el estudio dendroclimático de la especie, evitando el colapso por tala extractiva.

- Piso Social: Legalizar y dignificar la producción de carbón vegetal afroecuatoriano, asegurando precios justos y eliminando la criminalización de las comunidades vulnerables (Peña & Bräuning, 2026).

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Valorización íntegra del árbol (sombra, forraje y energía) y reincorporación del nitrógeno biológicamente fijado por la simbiosis rizobial al agroecosistema.

• Género, Inclusión y Enfoque Generacional: Incorporación de saberes locales en la identificación de "árboles madre" y capacitación técnica a jóvenes en el uso de herramientas de dendroclimatología para interpretar la resiliencia del ecosistema (Peña & Bräuning, 2026).

3.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

- Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Nodulación efectiva con Ensifer y Rhizobium bajo las condiciones estudiadas; el efecto sobre nitrógeno del suelo, estabilización de laderas y facilitación de la regeneración deberá medirse localmente (Cordero et al., 2016).

- Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Reducción drástica de conflictos legales por tala no autorizada, al proveer una fuente formal, planificada y comunitaria de energía térmica para cocción.

- Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Ahorro potencial en concentrados pecuarios, condicionado a que el análisis bromatológico confirme calidad y seguridad del forraje, e ingresos constantes por la venta de carbón con denominación de origen del Geoparque.

3.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

- Conclusiones del Perfil:

El bioemprendimiento con Vachellia macracantha propone evaluar si la conservación no está reñida con el uso. Al integrar la dendroclimatología y técnicas seguras de escarificación mecánica en vivero, la especie deja de ser un recurso depredado para convertirse en el pilar estructural del Desarrollo Regenerativo en el Geoparque Imbabura (Maldonado-Arciniegas et al., 2018; Peña & Bräuning, 2026).

- Preguntas de Metacognición y Debate:

1. ¿Qué información social, económica y ecológica sería necesaria para evaluar políticas sobre aprovechamiento de madera o carbón de V. macracantha sin desplazar costos hacia las comunidades locales?
2. Si las variables de crecimiento y vasos responden a la humedad y la temperatura, ¿cómo podría un silvicultor incorporar esa evidencia a la planificación de vivero y plantación? (Peña & Bräuning, 2026).

- Reto Práctico Profesional:

Ejercicio de Dendroclimatología Aplicada: A partir de las relaciones observadas entre crecimiento, anatomía de vasos y clima, proponga un cronograma de vivero y plantación que combine evidencia dendroclimática, pronósticos estacionales y monitoreo local, explicitando la incertidumbre de cada fuente de información (Peña & Bräuning, 2026).

3.9. Referencias Bibliográficas

Peña, K., & Bräuning, A. (2026). Effect of Climate on Ring-Width and Vessel Variables of Vachellia macracantha from Dry Forest in Southern Ecuador. *Tree-Ring Research,* 82(2), 89–102. https://doi.org/10.3959/TRR2025-7

Maldonado-Arciniegas, F., Ruales, C., Caviedes, M., Ramírez, D., & León-Reyes, A. (2018). An evaluation of physical and chemical scarification methods on seed germination of Vachellia macracantha. *Acta Agronomica,* 67(1), 120–125. https://doi.org/10.15446/acag.v67n1.60696

Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M. M., Rincón, A., & Pueyo, J. J. (2016). Rhizobial diversity, symbiotic effectiveness and structure of nodules of Vachellia macracantha. *Soil Biology* and Biochemistry, 96, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.011

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 4: *Tecoma stans* (L.) *Juss. ex Kunth* (Cholán / Floramarillo)



Tecoma stans (L.) *Juss. ex Kunth* (Cholán / Floramarillo)

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Singh et al., 2024; Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018; Alves et al., 2025; Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

4.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Biorrefinería Piloto de Fraccionamiento Fitoquímico (Alcaloides y Fenoles) de Tecoma stans con Enfoque de Control Ecológico en el Geoparque Imbabura.

- **Matriz de Priorización de Alternativas**: La selección de Tecoma stans se fundamenta en su alta capacidad de colonización y su perfil como especie pionera tolerante a condiciones variables. Ambientalmente, su aprovechamiento mediante recolección de biomasa foliar no destructiva permite valorizar la especie y simultáneamente aplicar un control poblacional que evite riesgos de invasividad documentados en otras regiones (Singh et al., 2024)-
- **Hipótesis de mercado y validación comercial:** Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. El perfil propone explorar segmentos nutracéuticos y biocosméticos para compuestos fenólicos, flavonoides y alcaloides, sin asumir demanda efectiva antes del estudio comercial y regulatorio. No obstante, la oferta local requiere estandarización fitoquímica y cumplimiento regulatorio estricto, dado que las propiedades farmacológicas actuales se enmarcan en evidencia preclínica (Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).
- **Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):** La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del

proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. El borrador propone como escala inicial el procesamiento de 3 toneladas anuales de biomasa foliar seca para sostener los costos de un laboratorio piloto de extracción y control de calidad toxicológica.

4.1.1. Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

4.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

- **Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-:**

- Problema Central: Subutilización de T. stans y riesgo de alteración ecológica por falta de manejo poblacional.

- Causas Directas: Atribución de propiedades curativas sin validación clínica estandarizada, y desconocimiento de protocolos de manejo seguro de la especie.

- Efectos: Comercialización informal insegura, pérdida de oportunidad de biocomercio regulado, y riesgo de desplazamiento de flora nativa por la alta plasticidad de la especie.

- **Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:**

- Objetivo Central: Establecer un manejo agroecológico controlado de T. stans articulado a una cadena de valorización fitoquímica segura.

- Medios: Diseño de ensayos de propagación controlada en vivero, estudios de toxicología e instalación de una biorrefinería de fraccionamiento.

- Fines: Ingresos rurales diversificados, salvaguarda de la salud pública, y control ecológico del paisaje (Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

4.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Consolidar la Bioeconomía Regenerativa en Imbabura mediante el aprovechamiento tecnológico, seguro y regulado de la biodiversidad local.

• Propósito: Biorrefinería de T. stans operando con protocolos de extracción estandarizados, con control preclínico y toxicológico documentado de sus bioactivos (Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

• Componentes (Resultados): 1. Viveros de T. stans con control de procedencias y evaluación de estrés hídrico instalados. 2. Planta de extracción y análisis fitoquímico en funcionamiento. 3. Gobernanza del conocimiento tradicional estructurada (Alves et al., 2025; Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

• Actividades: Evaluación del ajuste estomático en vivero bajo estrés hídrico; fraccionamiento de alcaloides y ácidos fenólicos; elaboración de un marco regulatorio comunitario para el biocomercio (Alves et al., 2025; Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Protocolos de conservación de semillas documentados y validados; lotes de extracto estandarizados bajo normativa INEN o equivalente (Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018).

• Supuestos y Riesgos: La plasticidad que favorece su establecimiento podría detonar un comportamiento invasor si el manejo de podas y semillas escapa al control territorial (Singh et al., 2024; Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018).

4.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-: El manejo debe ser adaptativo. Se mide el impacto del déficit hídrico sobre el crecimiento y la conductancia estomática. La extracción de hojas para la biorrefinería actúa como poda de control, evitando la formación excesiva de semillas y mitigando su dispersión descontrolada (Singh et al., 2024; Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018; Alves et al., 2025).

- **Flujo conceptual de procesos (Biorrefinería):**

1. Monitoreo y Cosecha: Recolección selectiva de biomasa foliar.
2. Extracción Estabilizada: Procesamiento de hojas para aislar alcaloides y compuestos fenólicos con solventes verdes.
3. Estandarización: Pruebas de toxicología y validación preclínica de los lotes extraídos.
4. Cero Residuos: La matriz foliar post-extracción solo podrá reutilizarse como mulch o abono después de verificar residuos de solventes, fitotoxicidad y compatibilidad con el suelo (Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

- Requerimientos Tecnológicos y Fitoquímicos: Rotavapores, equipos de cromatografía líquida (HPLC) para estandarización fitoquímica, e invernaderos con control de riego y humedad para evaluar la fisiología estomátic. (Alves et al., 2025; Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

4.5. Evaluación Financiera y Económica

- **Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales):**

- Inversión Inicial (CAPEX): $25,000 USD (Laboratorio de fraccionamiento fitoquímico básico y viveros controlados).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $11,000 USD (Personal técnico calificado, análisis de laboratorio, recolección).

- Proyección de Ventas (Anual): Suministro de extractos estandarizados para la industria cosmética/investigación por $19,500 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

- **Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:**

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

- **Control financiero para editorial**

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

4.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

- **Economía de la Dona (Doughnut Economics):**

- Techo Ecológico: Garantizar que la siembra y manejo del cholán no desplace flora nativa (control de invasividad).

- Piso Social: Creación de empleos en biotecnología rural y protección del consumidor mediante la exigencia de estándares de seguridad y toxicidad antes de cualquier oferta (Singh et al., 2024).

- Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Implementación de una cadena de valorización fitoquímica local, evitando la exportación de biomasa en bruto y reteniendo el valor agregado en Imbabura.
- Género, Inclusión y Generacional: Formalización de los saberes etnofarmacológicos liderados por mujeres andinas, integrando a

profesionales jóvenes del territorio en la ejecución de análisis cromatográficos y control de calidad (Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

4.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

- Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Ensayos de revegetación controlada que midan supervivencia y desempeño bajo déficit hídrico; la evidencia disponible documenta respuestas de crecimiento e intercambio gaseoso al estrés hídrico, no éxito de restauración en Imbabura (Alves et al., 2025).

- Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Sistematización y regulación del uso etnobotánico tradicional. Se transita del empirismo a la seguridad biomédica, protegiendo a las comunidades de posibles toxicidades no documentadas.

- Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Creación de un nicho de mercado de alto valor (compuestos bioactivos preclínicos) a partir de una especie rústica comúnmente subutilizada o tratada exclusivamente como cerco vivo u ornamental (Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

4.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

- Conclusiones del Perfil:

La viabilidad de este bioemprendimiento descansa en la rigurosidad científica. Al auditar la evidencia, se confirma que T. stans posee compuestos bioactivos prometedores (alcaloides, fenoles) y una excelente adaptación a la sequía. No obstante, el proyecto biocibernético obliga a ejercer control sobre su plasticidad para evitar invasiones biológicas y demanda estandarización regulatoria para

garantizar la seguridad de los extractos (Singh et al., 2024; Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

- Preguntas de Metacognición y Debate:

1. Dado que existen resultados farmacológicos preclínicos para compuestos de T. stans, ¿qué pasos de seguridad, regulación y gobernanza del conocimiento deberían preceder cualquier propuesta comercial a nivel comunitario?

2. ¿Cómo compararía experimentalmente costos, germinación y establecimiento entre siembra directa, semillas peletizadas y plantas de vivero en una ladera del Geoparque Imbabura? (Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018; Anand & Basavaraju, 2021; Costantino et al., 2003).

- Reto Práctico Profesional:

Bioingeniería de Viveros: Diseñe un ensayo piloto que compare semillas de T. stans sin tratamiento, un tratamiento pregerminativo respaldado por literatura (ej. conservación en condiciones controladas) y una formulación experimental de semilla peletizada. Defina réplicas, variables de emergencia, supervivencia, costos y un criterio de decisión estricto antes de escalar la siembra masiva (Vargas-Figueroa & Torres-González, 2018).

4.9. Referencias Bibliográficas

Singh, S., Miller, C. T., Singh, P., Sharma, R., Rana, N., Dhakad, A. K., & Dubey, R. K. (2024). A comprehensive review on ecology, life cycle and use of Tecoma stans (Bignoneaceae). *Botanical Studies,* 65, 6. https://doi.org/10.1186/s40529-024-00412-4

Vargas-Figueroa, J. A., & Torres-González, A. M. (2018). Germination and seed conservation of a pioneer species, Tecoma stans (Bignoniaceae), from tropical dry forest of Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 918–936. https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33423

Alves, M., Albuquerque, M. B. de, Pedroza Cruz, R. R., Jardelino Dias, T., & de Medeiros, E. C. (2025). Growth components and gas exchange in Tecoma stans L. plants under water stress. *Comunicata Scientiae*, 16, e4303. https://doi.org/10.14295/cs.v16.4303

Anand, M., & Basavaraju, R. (2021). A review on phytochemistry and pharmacological uses of Tecoma stans (L.) Juss. ex Kunth. *Journal of Ethnopharmacology*, 265, 113270. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113270

Costantino, L., Raimondi, L., Pirisino, R., Brunetti, T., Pessotto, P., Giannessi, F., Lins, A. P., Barlocco, D., Antolini, L., & El-Abady, S. A. (2003). Isolation and pharmacological activities of the Tecoma stans alkaloids. *Il Farmaco,* 58(9), 781–785. https://doi.org/10.1016/S0014-827X(03)00133-2

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 5: *Sapindus saponaria L.* (Jaboncillo)



Sapindus saponaria L. (Jaboncillo)

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Cabral et al., 2019; Tsuzuki et al., 2007; Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2021; Paiva et al., 2026; Hernández-Jaramillo et al., 2012).

5.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Biorrefinería Comunitaria de Saponinas Triterpénicas para la Formulación de Biosurfactantes y Remediación en el Valle del Chota.

- Matriz de Priorización de Alternativas:

La selección de Sapindus saponaria se justifica por la abundancia natural de sus frutos y su alto contenido de saponinas. Ecológicamente, permite un aprovechamiento forestal no maderable (PFNM) sin talar el árbol. Socialmente, el eventual vínculo con prácticas afroecuatorianas de limpieza se tratará como hipótesis etnobotánica que debe documentarse con consentimiento informado antes de presentarse como antecedente histórico. (Tsuzuki et al., 2007; Paiva et al., 2026)

- Hipótesis de mercado y validación comercial:

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. Mercado potencial regional y nacional de productos de limpieza biodegradables (detergentes botánicos) y bioinsumos para remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. La sustitución de tensoactivos sintéticos por extractos de jaboncillo tiene un nicho potencial que debe validarse mediante estudio de mercado en el eco-hotelería del Geoparque Imbabura.

- Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. El borrador propone como escala inicial el procesamiento de 3.5 toneladas anuales de frutos (pericarpio) para sostener los costos operativos del laboratorio de extracción hidroalcohólica y la logística de recolección comunitaria.

5.1.1. Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

5.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

- Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-

- Problema Central: Necesidad de evaluar alternativas locales de limpieza de menor impacto y, en paralelo, documentar de manera rigurosa cualquier memoria biocultural asociada al jaboncillo.

- Causas Directas: Ausencia de alternativas locales de limpieza escalables, desconocimiento de los protocolos de extracción de saponinas y alta depredación predispersiva de las semillas.

- Efectos: Riesgo potencial de impactos sobre calidad de agua por formulaciones inadecuadas, junto con bajo valor agregado local del recurso (Tsuzuki et al., 2007; Hernández-Jaramillo et al., 2012).

- Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:

- Objetivo Central: Establecer una cadena de valor biobasada mediante la producción de biosurfactantes de S. saponaria.

- Medios: Instalación de plantas de extracción comunitaria, formulación de jabones líquidos y validación de técnicas de propagación y control de calidad de semillas en vivero.

- Fines: Reducción de la contaminación hídrica, reactivación económica del Valle del Chota y evaluación de remediación de suelos mediante biosurfactantes vegetales (Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2021; Paiva et al., 2026).

5.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Aumentar la resiliencia hídrica y socioeconómica del Geoparque Imbabura a través de la economía circular y la química verde.

• Propósito: Biorrefinería comunitaria operando eficientemente en la producción de biosurfactantes estandarizados de S. saponaria.

• Componentes (Resultados): 1. Vivero forestal con protocolos de escarificación mecánica y control de plagas seminales. 2. Planta de extracción hidroalcohólica operativa. 3. Bioproductos (jabón líquido y extracto remediador) validados (Cabral et al., 2019; Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2021; Paiva et al., 2026).

• Actividades: Selección de semillas por flotabilidad para detectar daño por insectos; extracción de saponinas; ensayos piloto de remediación de hidrocarburos (Tsuzuki et al., 2007; Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2021).

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Volumen de biosurfactante comercializado (litros/mes); porcentaje de germinación en vivero garantizado mediante escarificación mecánica y sustratos controlados (Cabral et al., 2019; Paiva et al., 2026).

• Supuestos y Riesgos: Fluctuaciones climáticas que afecten la fructificación anual o resistencia de mercado frente al cambio de detergentes tradicionales.

5.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-:

La recolección de frutos del suelo forestal se acopla a un sistema de selección donde el pericarpio se destina a la biorrefinería y la semilla intacta se devuelve al vivero para garantizar la regeneración del rodal, cerrando el ciclo.

• Flujo conceptual de procesos (Biorrefinería):

1. Recolección y Control de Calidad: Clasificación de frutos y métodos de inspección y separación -incluida la flotabilidad como hipótesis a validar- para detectar semillas atacadas por el cerambícido Leptostylus gibbulosus.
2. Despulpado: Separación del pericarpio rico en saponinas y la semilla esclerenquimatosa.
3. Extracción: Proceso hidroalcohólico para aislar las saponinas triterpénicas.
4. Formulación: Desarrollo de jabón líquido ecológico y extractos para remediación experimental de suelo contaminado con gasoil.
5. Viverización: Las semillas viables son sometidas a escarificación mecánica (superando su profunda dormancia física) para germinación. (Cabral et al., 2019; Tsuzuki et al., 2007; Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2021; Paiva et al., 2026; Hernández-Jaramillo et al., 2012)

• Requerimientos Tecnológicos: Despulpadoras mecánicas, tanques de maceración y extracción con solventes, agitadores industriales, e infraestructura de vivero.

5.5. Evaluación Financiera y Económica

• Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales):

- Inversión Inicial (CAPEX): $18,000 USD (Equipos de extracción, adecuación de laboratorio y vivero).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $7,500 USD (Insumos, mano de obra local afroecuatoriana, empaques biodegradables).

- Proyección de Ventas (Anual): Venta de detergentes botánicos y extractos para remediación estimados en $16,000 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

• Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

5.5.1. Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

5.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

- Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Garantizar que la recolección de frutos no agote el banco de semillas del suelo y que los vertidos de los detergentes no presenten ecotoxicidad en los ríos andinos.

- Piso Social: Reivindicar y remunerar justamente a las familias recolectoras, reconociendo el conocimiento afroecuatoriano en el uso histórico de la especie para la limpieza.

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Las aguas residuales del proceso de extracción se filtran y los sólidos orgánicos del pericarpio agotado se compostan para los viveros forestales comunitarios.

• Género, Inclusión y Enfoque Generacional: Incorporación directa de asociaciones de mujeres del Valle del Chota en la formulación y comercialización de la línea de jabones líquidos, fusionando el patrimonio inmaterial con la química verde contemporánea.

5.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

• Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Sustitución potencial de parte de los tensoactivos sintéticos, condicionada a pruebas de desempeño, biodegradabilidad y ecotoxicidad. Potencial de remediación en suelos contaminados con gasoil, donde extractos de S. saponaria han demostrado experimentalmente en laboratorio remociones de hasta el 93.9% (Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2021).

• Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Revalorización del bosque seco y del saber etnobotánico afroecuatoriano. Creación de laboratorios de química verde que transfieren tecnología y conocimiento a las zonas rurales de Imbabura.

• Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Generación de valor agregado in situ, transformando un recurso botánico (anteriormente subutilizado o utilizado solo a nivel doméstico de subsistencia) en un producto comercial estandarizado.

5.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

• Conclusiones del Perfil:

El perfil de proyecto para Sapindus saponaria integra la biocibernética regenerativa. Al controlar la propagación mediante escarificación mecánica de semillas verificadas y transformar los frutos en biosurfactantes, el Geoparque Imbabura puede articular el saneamiento de sus fuentes hídricas con la autonomía económica de las comunidades afroecuatorianas, demostrando la escalabilidad de la economía basada en la naturaleza (Cabral et al., 2019; Paiva et al., 2026).

• Preguntas de Metacognición y Debate:

1. Dado que las saponinas poseen actividad biológica y antifúngica demostrada (ej. contra Candida albicans), ¿qué pruebas ecotoxicológicas serían necesarias antes de descargar formulaciones basadas en S. saponaria en cuerpos de agua naturales?
2. ¿Cómo compararía la propagación sexual y vegetativa de S. saponaria sin asumir de antemano la inviabilidad de uno de los métodos, y qué indicadores productivos usaría para el vivero? (Cabral et al., 2019; Tsuzuki et al., 2007)

• Reto Práctico Profesional:

Logística de Viveros en Presencia de Depredadores de Semillas: Diseñe un flujograma de control de calidad para un lote de semillas de jaboncillo y proponga métodos de inspección o separación (ej. pruebas de flotabilidad) que permitan detectar daño predispersivo por el escarabajo Leptostylus gibbulosus, justificando cómo validaría experimentalmente la eficacia del método elegido (Cabral et al., 2019; Hernández-Jaramillo et al., 2012).

5.9. Referencias Bibliográficas

Cabral, A. L., Sales, J. de F., Barbosa, K. F., Rodrigues, A. A., Zuchi, J., Silva, J. M. D., & Vasconcelos Filho, S. C. (2019). Dormancy breakage and germination in Sapindus saponaria L. seeds as a function of temperature

and germination substrate. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(6Supl3), 3345–3358. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl3p3345

Tsuzuki, J. K., Svidzinski, T. I. E., Shinobu, C. S., Silva, L. F. A., Rodrigues-Filho, E., Cortez, D. A. G., & Ferreira, I. C. P. (2007). Antifungal activity of the extracts and saponins from Sapindus saponaria L. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79(4), 577–583. https://doi.org/10.1590/S0001-37652007000400002

Marín-Velásquez, T. D., & Arriojas-Tocuyo, D. D. J. (2021). Efecto remediador de extractos de Sapindus saponaria sobre un suelo contaminado con gasoil a nivel de laboratorio. *Ciencia & Desarrollo*, 20(1), 13–26. https://doi.org/10.33326/26176033.2021.1.1105

Paiva, M. J. M., Araujo, M. S., Carvalho, N. L., Paiva, R. F. D., Herrera, S. D. S. C., Vellano, P. O., D'Alessandro, W. B., Santos, T. T., & Souza, G. S. (2026). Application of Sapindus saponaria L. extract as a natural biosurfactant in liquid soap formulation. *Brazilian Journal of Biology*, 86, e300385. https://doi.org/10.1590/1519-6984.300385

Hernández-Jaramillo, A., Pinzón, O. P., & Parrado-Rosselli, Á. (2012). Depredación de las semillas de Sapindus saponaria L. por Leptostylus gibbulosus Bates (Coleoptera: Cerambycidae) y su efecto en la germinación. *Colombia Forestal,* 15(2), 247–260. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a08

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 6: *Bursera graveolens* (Kunth) *Triana & Planch* (Palo Santo)



Bursera graveolens (Kunth) *Triana & Planch* (Palo Santo)

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Armijos et al., 2021; Benítez et al., 2023; Fon-Fay et al., 2019; Jaramillo-Colorado et al., 2019).

6.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Biorrefinería de Aceites Esenciales y Biocidas Botánicos con Trazabilidad Poblacional de Bursera graveolens en el Geoparque Imbabura.

- **Matriz de Priorización de Alternativas:**

La selección prioriza el aprovechamiento como Producto Forestal No Maderable (PFNM) para mitigar las presiones sobre las poblaciones silvestres. Dado que los estudios demuestran déficits de regeneración natural y ausencia de la curva de "J" invertida en poblaciones andinas, la alternativa biobasada se justifica condicionando la extracción aromática a la protección de los brinzales frente al pastoreo caprino (Benítez et al., 2023).

- **Hipótesis de mercado y validación comercial:**

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. El perfil propone evaluar mercados de formulaciones aromáticas/cosméticas y aplicaciones biocidas experimentales. El aceite esencial ecuatoriano, rico en limoneno (34.9%) y α-terpineol (13.4%), presenta un perfil químico de interés; la trazabilidad legal y geográfica se adopta como requisito del proyecto y deberá contrastarse con la normativa y las especificaciones reales de compradores (Fon-Fay et al., 2019).

- **Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):**

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso,

precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. El borrador propone como escala inicial la extracción y comercialización de 80 litros anuales de aceite esencial estandarizado, operando exclusivamente con material trazable y legal para cubrir los costos logísticos y de destilación comunitaria.

6.1.1. Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

6.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

- **Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-**

- Problema Central: Alteración de la estructura diamétrica y amenaza de conservación de B. graveolens por pastoreo excesivo y extracción no monitoreada.

- Causas Directas: Presión del ganado caprino sobre la regeneración natural y demanda de madera sin esquemas de trazabilidad.

- Efectos: Ausencia de individuos juveniles (falta de curva J invertida), envejecimiento de los rodales y erosión de la memoria etnobotánica (Benítez et al., 2023).

- **Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:**

- Objetivo Central: Instituir una cadena de biocomercio no maderable anclada al monitoreo poblacional de la especie.

- Medios: Exclusión de áreas de pastoreo, viverismo controlado y destilación de madera estrictamente legal y georreferenciada.

- Fines: Recuperación de la curva demográfica del palo santo, biocomercio ético y retención de rentas rurales (Benítez et al., 2023).

6.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Potenciar la resiliencia poblacional de B. graveolens y la prosperidad comunitaria en el Geoparque Imbabura.

• Propósito: Biorrefinería operando bajo estrictos protocolos de trazabilidad y monitoreo demográfico, evitando incentivos a la extracción ilícita.

• Componentes (Resultados): 1. Inventario forestal continuo y monitoreo de regeneración establecido. 2. Planta de hidrodestilación modular instalada. 3. Biocidas y aceites analizados fitoquímicamente (Benítez et al., 2023; Jaramillo-Colorado et al., 2019; Armijos et al., 2021).

• Actividades: Delimitación de zonas de acopio legal; ensayos cromatográficos del aceite esencial; pruebas de repelencia contra insectos plaga (Fon-Fay et al., 2019; Jaramillo-Colorado et al., 2019).

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Aumento documentado en la densidad de regeneración (brinzales/ha); volumen de aceite producido con certificados de trazabilidad.

• Supuestos y Riesgos: La volatilidad de los precios en el mercado internacional puede incentivar la tala ilegal si no existen controles gubernamentales eficientes.

6.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-: La biorrefinería opera como un actuador del ecosistema: la tasa de aprovechamiento se supedita estrictamente a los índices de regeneración poblacional. Si el monitoreo muestra una caída en el reclutamiento juvenil, la

cuota de acopio de madera caída se congela, cerrando el bucle de retroalimentación (Benítez et al., 2023).

• Flujo conceptual de procesos (Biorrefinería):

1. Recolección Trazable: Acopio exclusivo de material vegetal legalmente amparado.
2. Hidrodestilación: Extracción de la fracción volátil (aceite esencial) rica en limoneno y α-terpineol.
3. Valorización Biocida: Formulación experimental de repelentes y fumigantes, evaluados contra plagas como Tribolium castaneum (LC50 de 108,2 µg/mL en las condiciones del bioensayo publicado).
4. Cero Residuos: La biomasa agotada por destilación se evalúa para compostaje o biochar; su reincorporación requiere caracterización del residuo y del producto final (Fon-Fay et al., 2019; Jaramillo-Colorado et al., 2019).

• Requerimientos Tecnológicos: Destiladores por arrastre de vapor de 200L, sistemas GPS para georreferenciación de acopio, y equipos GC-MS en alianza académica para validar perfiles terpénicos.

6.5. Evaluación Financiera y Económica

• Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales):

- Inversión Inicial (CAPEX): $19,500 USD (Alambiques, capacitación en monitoreo forestal, certificación de origen).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $8,200 USD (Monitoreo de parcelas, destilación, envasado y logística).

- Proyección de Ventas (Anual): Suministro a industrias especializadas por $18,500 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

• Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

6.5.1. Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

6.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

• Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Limitado por la disponibilidad de material rastreable y la estructura demográfica real del bosque (respetando la falta temporal de regeneración).

- Piso Social: Fortalecimiento de la economía rural mediante el pago justo por recolección legal, respetando el uso tradicional del incienso. (Benítez et al., 2023)

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Superación de la venta de madera en bruto hacia el aislamiento de terpenos de alto valor, reciclando la totalidad del desecho hidrodestilado.

• Género, Inclusión y Enfoque Generacional: Incorporación de saberes locales en la formulación de ungüentos analgésicos, integrando asociaciones femeninas en el etiquetado y valorización del bioproducto.

6.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

• Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Fomento a la conservación in situ mediante la protección activa de renuevos (brinzales) contra herbívoros, indispensable para garantizar la materia prima a largo plazo.

• Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Articulación del conocimiento tradicional (usos para artritis y como analgésico) con prácticas formales de biocomercio, eliminando la clandestinidad del aprovechamiento.

• Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Creación de una cadena de valor trazable y legal que genera mayores utilidades con menor volumen de extracción, disuadiendo el tráfico ilegal del PFNM.

6.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

• Conclusiones del Perfil:

El bioemprendimiento de Bursera graveolens exige la aplicación estricta de la biocibernética. La evidencia auditada demuestra que la especie sufre un déficit de regeneración en ciertas zonas andinas. Por tanto, la viabilidad de su biorrefinería no recae en reglas arbitrarias, sino en supeditar la escala comercial al monitoreo continuo del reclutamiento poblacional y al diseño de protocolos biocidas verificados (Benítez et al., 2023; Jaramillo-Colorado et al., 2019).

• Preguntas de Metacognición y Debate:

1. ¿Qué mecanismos de trazabilidad, monitoreo poblacional y control de origen deberían acompañar una cadena comercial de aceite esencial de B. graveolens para evitar incentivos a la extracción ilegal?

2. ¿Qué implicaciones genéticas y operativas tendría priorizar la propagación clonal sobre la reproducción sexual en B. graveolens? (Benítez et al., 2023; Fon-Fay et al., 2019).

• Reto Práctico Profesional:

Mapeo de Biorrefinería con Trazabilidad. Diseñe el flujo de operaciones de una cooperativa comunitaria de palo santo partiendo de material legal y georreferenciado, incorporando extracción de aceite, manejo de residuos y un sistema de control que vincule la tasa de aprovechamiento con el monitoreo de regeneración forestal (Benítez et al., 2023).

6.9. Referencias Bibliográficas

Armijos, C., Ramírez, J., Salinas, M., Vidari, G., & Suárez, A. I. (2021). Pharmacology and Phytochemistry of Ecuadorian Medicinal Plants: An Update and Perspectives. *Pharmaceuticals,* 14(11), 1145. https://doi.org/10.3390/ph14111145

Benítez, Á., Chalán, J., Tinitana, F., Morocho, V., Armijos, L., & Malagon, O. (2023). Estructura diamétrica de Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch: especie con potencial uso no maderable. *Bosques Latitud Cero*, 13(2), 70–79. https://doi.org/10.54753/blc.v13i2.1658

Fon-Fay, F. M., Pino, J. A., Hernández, I., Rodeiro, I., & Fernández, M. D. (2019). Chemical composition and antioxidant activity of Bursera graveolens (Kunth) Triana et Planch essential oil from Manabí, Ecuador. Journal of *Essential Oil Research*, 31(3), 211–216. https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1564381

Jaramillo-Colorado, B. E., Suarez-López, S., & Marrugo-Santander, V. (2019). Volatile chemical composition of essential oil from Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch and their fumigant and repellent activities. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 41, e46822. https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v41i1.46822

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis

comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 7: *Jatropha curcas L.* (Piñón)



Jatropha curcas L. (Piñón)

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Abdelgadir & Van Staden, 2013; Divakara et al., 2010; Contran et al., 2013; Joshi et al., 2011; Bose & Keharia, 2014; Cao et al., 2025).

7.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Biorrefinería Descentralizada de Biodiésel y Bioabonos Detoxificados a partir de Jatropha curcas en el Valle del Chota.

• Matriz de Priorización de Alternativas:

La selección de J. curcas se justifica técnicamente por su interés como cultivo oleaginoso no alimentario, evitando asumir que cualquier establecimiento en tierras marginales sea automáticamente productivo o libre de conflictos de uso. Ambientalmente, la estabilización de laderas no se atribuye automáticamente a la especie: deberá medirse arquitectura radical, resistencia del suelo y desempeño del sistema de plantación. Socialmente, la gobernanza descentralizada de la biorrefinería evita el fracaso de modelos extractivistas centralizados del pasado.

• Hipótesis de mercado y validación comercial:

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. La demanda se divide en dos líneas: biodiésel para consumo local en maquinaria agrícola y bioabonos seguros y humificados para la regeneración de suelos. Los ésteres de forbol son compuestos tóxicos; cualquier exploración de actividad biocida se limita a I+D controlada y no se considera una línea comercial hasta demostrar eficacia, seguridad y cumplimiento regulatorio (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010; Abdelgadir & Van Staden, 2013; Cao et al., 2025).

• Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. Procesamiento de 12 toneladas anuales de semilla seca para sostener los costos de extracción de lípidos y el mantenimiento de los reactores de fermentación en estado sólido (SSF).

7.1.1.Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

7.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

- **Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-**

- Problema Central: Degradación de suelos y alta dependencia de combustibles e insumos fósiles en las comunidades afroecuatorianas del Geoparque.

- Causas Directas: Ausencia de alternativas energéticas locales, manejo inadecuado de subproductos tóxicos agrícolas, e intentos previos de bioenergía fallidos por falta de inclusión comunitaria.

- Efectos: Erosión hídrica en laderas, fuga de capitales rurales y abandono de las tradicionales cercas vivas.

- **Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-**

- Objetivo Central: Establecer un modelo energético y agronómico circular y autogestionado mediante la valorización integral del piñón.

- Medios: Diseño de biorrefinerías de segunda generación con procesos de detoxificación fúngica y comparación de propagación sexual y vegetativa según

el objetivo productivo y de restauración, sin atribuir estabilidad biomecánica sin mediciones locales.

- Fines: Autonomía energética, suelos restaurados y fortalecimiento del tejido social afroandino (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010).

7.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Consolidar la autonomía energética y la resiliencia edáfica del Geoparque Imbabura mediante el Desarrollo Regenerativo.

• Propósito: Biorrefinería comunitaria operando un ciclo "cero residuos" como objetivo de diseño que transforma una biomasa tóxica en energía y biofertilizante seguro.

• Componentes (Resultados): 1. Viveros forestales con comparación documentada de material sexual y, cuando proceda, vegetativo. 2. Planta de extracción de aceite para biodiésel operativa. 3. Unidad de Fermentación en Estado Sólido (SSF) funcional (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010; Bose & Keharia, 2014).

• Actividades: Recolección y secado de semillas; prensado y transesterificación; fermentación de la torta residual con microorganismos cuya eficacia esté demostrada, incluyendo Pseudomonas aeruginosa PseA y hongos de pudrición blanca seleccionados; validación toxicológica del bioabono (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010; Abdelgadir & Van Staden, 2013; Cao et al., 2025; Bose & Keharia, 2014).

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Litros de biodiésel producidos al mes; reducción de ésteres de forbol hasta un umbral analítico y toxicológico predefinido; no se adopta un porcentaje universal (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010; Abdelgadir & Van Staden, 2013; Cao et al., 2025).

• Supuestos y Riesgos: Las sequías extremas prolongadas pueden afectar la cuaja de los frutos disminuyendo el rendimiento de aceite de la accesión CP041 o locales (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010).

7.4.Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-: El método de propagación se selecciona según el objetivo y se valida en campo. No se prohíbe la propagación vegetativa por una supuesta inferioridad biomecánica sin datos específicos de arquitectura radical y estabilidad de ladera.

• Flujo conceptual de procesos (Biorrefinería):

1. Prensado: Extracción mecánica de los lípidos (hasta 55% de la almendra).
2. Ruta Energética: Transesterificación del aceite para producir Biodiésel (índice de cetano >51).
3. Ruta de Detoxificación: La torta de semilla se somete a tratamientos microbianos validados. Pseudomonas aeruginosa PseA logró degradación completa bajo condiciones experimentales específicas; en el estudio con hongos de pudrición blanca, Ganoderma lucidum y Trametes zonata llevaron los ésteres de forbol a niveles no detectables, mientras que especies de Pleurotus redujeron alrededor del 70%.
4. Cero Residuos: Las enzimas degradan los ésteres de forbol, obteniendo un coproducto que solo podrá destinarse a uso agronómico tras comprobar analíticamente la reducción de ésteres de forbol y otros factores antinutricionales, además de su inocuidad (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010; Abdelgadir & Van Staden, 2013; Cao et al., 2025; Joshi et al., 2011; Bose & Keharia, 2014).

• Requerimientos Tecnológicos: Prensas expulsoras en frío, reactores de transesterificación, cámaras termorreguladas para SSF y equipos de cromatografía para auditar la reducción de toxicidad (Abdelgadir & Van Staden, 2013; Cao et al., 2025).

7.5.Evaluación Financiera y Económica

• Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales):

- Inversión Inicial (CAPEX): $28,000 USD (Prensas mecánicas, reactores biodiésel, área estéril para incubación SSF).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $9,500 USD (Insumos microbiológicos, mantenimiento, jornales de cosecha).

- Proyección de Ventas (Anual): Ahorro por sustitución de combustible diésel y venta de bioabonos estandarizados por $21,000 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

• Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

7.5.1.Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

7.6.Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

• Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Plantaciones restringidas a suelos erosionados o marginales, evitando la deforestación y la competencia con la soberanía alimentaria.

- Piso Social: Autonomía y gobernanza comunitaria sobre los medios de producción de energía, rompiendo los fracasos del modelo extractivista "top-down" que marginaba al campesino.

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Transformación biocibernética donde un subproducto letal (torta tóxica) se metaboliza enzimáticamente hasta convertirse en el insumo que recupera el paisaje andino.

• Género, Inclusión y Generacional: Rescate de la técnica constructiva de "cercas vivas" de las comunidades de Juncal y Carpuela, protegiendo las chacras del pastoreo caprino y revalorizando este patrimonio vivo con la participación de jóvenes técnicos locales.

7.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

• Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

El proyecto deberá medir por separado cualquier efecto de remediación de suelo y de estabilidad de ladera; no se atribuyen a J. curcas capacidades universales de fitorremediación ni de anclaje biomecánico sin ensayos específicos.

• Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Soberanía energética para las asociaciones agropecuarias afroecuatorianas del Valle del Chota, empoderándolas como dueñas de las refinerías modulares.

• Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Creación de una matriz energética local libre de shocks internacionales de precios de los combustibles fósiles, cerrando la fuga de capitales rurales hacia insumos químicos.

7.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

• Conclusiones del Perfil:

El perfil de Jatropha curcas integra una ruta energética con una ruta de detoxificación. La literatura demuestra que ciertos microorganismos reducen o degradan ésteres de forbol bajo condiciones experimentales; cualquier uso agronómico del coproducto exige verificación analítica y toxicológica del lote. La contribución a suelos y laderas deberá demostrarse en campo, y la viabilidad social dependerá de la gobernanza comunitaria (Abdelgadir & Van Staden, 2013; Cao et al., 2025).

• Preguntas de Metacognición y Debate:

1. ¿Qué diferencias de arquitectura radical, supervivencia y estabilidad del suelo deberían medirse antes de elegir material sexual o vegetativo de J. curcas para laderas?

2. Dado que la eficacia de degradación de ésteres de forbol varía entre microorganismos, ¿cómo diseñaría una comparación analítica entre Pseudomonas aeruginosa PseA, Ganoderma lucidum, Trametes zonata y especies de Pleurotus antes de autorizar el uso agronómico de la torta? (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010; Abdelgadir & Van Staden, 2013; Cao et al., 2025; Bose & Keharia, 2014).

• Reto Práctico Profesional:

Diseño de Biorrefinería de Segunda Generación: Elabore el diagrama de flujo operativo de una biorrefinería comunitaria de Piñón. Incorpore la extracción del aceite (lípidos), especifique la validación analítica de la torta, y diseñe la etapa de Fermentación en Estado Sólido (SSF) con hongos para transformar el residuo en bioabono aplicable al Geoparque Imbabura (Contran et al., 2013; Divakara et al., 2010; Bose & Keharia, 2014).

7.9. Referencias Bibliográficas

Abdelgadir, H. A., & Van Staden, J. (2013). Ethnobotany, ethnopharmacology and toxicity of Jatropha curcas L. (Euphorbiaceae): *A review*. South

African Journal of Botany, 88, 204–218. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.07.021

Divakara, B. N., Upadhyaya, H. D., Wani, S. P., & Laxmipathi Gowda, C. L. (2010). Biology and genetic improvement of Jatropha curcas L.: *A review*. Applied Energy, 87(3), 732–742. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.013

Contran, N., Chessa, L., Lubino, M., Bellavite, D., Roggero, P. P., & Enne, G. (2013). State-of-the-art of the Jatropha curcas productive chain: From sowing to biodiesel and by-products. *Industrial Crops and Products*, 42, 202–215. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.037

Joshi, C., Mathur, P., & Khare, S. K. (2011). Degradation of phorbol esters by Pseudomonas aeruginosa PseA during solid-state fermentation of deoiled Jatropha curcas seed cake. *Bioresource Technology*, 102(7), 4815–4819. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.039

Bose, A., & Keharia, H. (2014). Phorbol ester degradation in Jatropha seedcake using white rot fungi. 3 *Biotech,* 4, 447–450. https://doi.org/10.1007/s13205-013-0174-9

Cao, X., Wei, X., Shao, Y., Li, D., & Zhu, J. (2025). Jatropha curcas seed oil for possible human consumption: A toxicological assessment of its phorbol esters. *Toxicology Reports,* 14, 101870. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101870

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 8: *Calliandra pittieri Standl.* (Carbonero / Pluma de Yátero)



Calliandra pittieri Standl. (Carbonero / Pluma de Yátero)

- **Base científica verificada**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Govaerts et al., 2021; Leython, 2010).

8.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Validación Agroforestal, Investigación Biocultural y Potencial Melífero de Calliandra pittieri en el Geoparque Imbabura.

• Matriz de Priorización de Alternativas:

La selección de C. pittieri (Fabaceae) se prioriza bajo un enfoque precautorio. Dado que su distribución nativa se asocia primariamente con biomas tropicales húmedos, su establecimiento en el bosque seco del Valle del Chota requiere una validación ecológica antes de su explotación a gran escala. La alternativa biobasada prioriza medir sus servicios ecosistémicos (forraje, néctar) in situ antes de la extracción (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Govaerts et al., 2021).

• Hipótesis de mercado y validación comercial:

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. La meliponicultura y los sistemas ganaderos se consideran segmentos potenciales que solo podrán evaluarse después de validar oferta floral, calidad del forraje y adaptación edafoclimática. Sin embargo, los valores específicos de grados Brix y proteína deben validarse localmente mediante investigación aplicada antes de proyectar la oferta comercial.

• Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad.

Establecimiento de parcelas piloto (2 a 3 hectáreas) que generen datos técnicos y produzcan volúmenes iniciales de miel y forraje suficientes para cubrir los costos de monitoreo e investigación comunitaria.

8.1.1.Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

8.2.Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

- **Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-:**

- Problema Central: Introducción o uso de especies en programas de restauración sin la debida validación edafoclimática y pérdida de saberes etnobotánicos no documentados formalmente.

- Causas Directas: Escasez de ensayos de procedencia en viveros y adopción de supuestos ecológicos no medidos en el territorio andino árido.

- Efectos: Fracaso de plantaciones forestales, pérdida de inversión pública y erosión del patrimonio biocultural afroecuatoriano.

- **Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:**

- Objetivo Central: Validar la compatibilidad ecológica y documentar las funciones agroforestales y culturales del carbonero en el Geoparque.

- Medios: Diseño de ensayos de establecimiento con procedencias locales, medición de néctar/polinizadores e investigación etnobotánica rigurosa.

- Fines: Reducción del riesgo en la restauración, desarrollo de bioeconomías basadas en datos reales y protección del patrimonio inmaterial.

8.3.Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Consolidar modelos agroforestales regenerativos sustentados en evidencia científica y pertinencia biocultural.

• Propósito: C. pittieri evaluada integralmente en sus variables silviculturales, melíferas y forrajeras bajo las condiciones locales de Imbabura.

• Componentes (Resultados):

1. Parcelas experimentales en bloques instaladas.

2. Parámetros de calidad del néctar y forraje cuantificados.

3. Documentación etnobotánica con consentimiento informado finalizada.

• Actividades: Viverización acompañada de caracterización morfológica de semillas; la literatura disponible es principalmente a nivel de género y debe verificarse para C. pittieri; monitoreo de supervivencia y crecimiento; entrevistas etnobotánicas para establecer si existen usos maderables o culturales localmente documentables, sin asumir de antemano su relación con instrumentos musicales (Leython, 2010).

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Tasa de supervivencia (%) en parcelas piloto al primer año; documento publicado de usos culturales con identificación taxonómica validada.

• Supuestos y Riesgos: La especie podría no exhibir la tolerancia al estrés hídrico extremo esperada, requiriendo reubicación a nichos más húmedos del Geoparque (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Govaerts et al., 2021).

8.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-: El bucle se fundamenta en el aprendizaje adaptativo: "medir antes de escalar". El aprovechamiento silvopastoril o apícola se retroalimenta de los datos de campo. No se asumen tasas universales de fijación de nitrógeno ni productividad sin comprobación.

• Flujo conceptual de procesos (Validación Bioeconómica):

1. Vivero: Caracterización morfológica de semillas y establecimiento de plantas.
2. Parcelas Piloto: Siembra en arreglos agroforestales comparando con especies locales consolidadas y controles sin árboles.
3. Monitoreo Fisiológico: Medición de visitantes florales, rendimiento de biomasa y resistencia a la sequía.
4. Validación Biocultural: investigación de usos tradicionales potenciales, incluida la identificación botánica de cualquier madera asociada a percusión afroecuatoriana mediante encuestas y botánica.
5. Escalamiento: Diseño de la cadena de valor (miel, forraje) solo si se superan los umbrales de viabilidad (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Govaerts et al., 2021; Leython, 2010).

• Requerimientos Tecnológicos: Refractómetros para medición de azúcares en néctar, equipos de análisis bromatológico para forraje y herramientas de investigación cualitativa (encuestas etnobotánicas).

8.5. Evaluación Financiera y Económica

• Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales de Fase Piloto):

- Inversión Inicial (CAPEX): $10,500 USD (Establecimiento de parcelas, equipos de medición de laboratorio y campo).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $4,200 USD (Monitoreo técnico, trabajo comunitario, procesamiento de datos).

- Proyección de Ventas (Anual): Ingresos iniciales por productos apícolas y ahorro de forraje durante la validación estimados en $7,500 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

• Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

8.5.1. Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

8.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

• Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Prevención de impactos no deseados al aplicar precaución biogeográfica (no forzar a la especie a ambientes de desertificación severa sin probar su adaptación).

- Piso Social: Financiación de la ciencia ciudadana, donde los comuneros afroecuatorianos son co-investigadores pagados, no solo sujetos de estudio.

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Formulación de modelos silvopastoriles que cierren el ciclo del nitrógeno a nivel predial si los ensayos locales confirman la viabilidad de la biomasa foliar como abono verde.

• Género, Inclusión y Generacional: El proyecto exige que el registro de los saberes orales sobre usos de C. pittieri involucre a los adultos mayores de las

comunidades, y que las técnicas de monitoreo de polinización sean lideradas por mujeres meliponicultoras.

8.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

• Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Prevención de desastres ecológicos asociados a la introducción masiva de germoplasma no validado. Fomento de la polinización y evaluación objetiva de servicios ecosistémicos.

• Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Documentación formal, respetuosa y con consentimiento informado del patrimonio biocultural afroecuatoriano, reconociendo legalmente la autoría de sus saberes botánicos.

• Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Creación de una línea base de bioeconomía confiable que servirá para apalancar financiamiento internacional de gran escala, una vez superada y demostrada la fase de validación in situ.

8.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

• Conclusiones del Perfil:

El proyecto de Calliandra pittieri encarna la honestidad de la biocibernética regenerativa. Al constatar que la especie se asocia primariamente con climas húmedos, el proyecto se transforma de una explotación ciega a un laboratorio vivo agroforestal y biocultural, donde la ciencia y la comunidad miden, validan y luego deciden el escalamiento comercial (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Govaerts et al., 2021).

• Preguntas de Metacognición y Debate:

1. ¿Cómo diseñaría un estudio para medir concentración de azúcares del néctar, visitantes florales y posibles efectos sobre polinizadores antes de promover C. pittieri en un agroecosistema?
2. Si una investigación etnobotánica confirmara usos maderables o culturales de C. pittieri, ¿qué mecanismos de gobernanza y monitoreo serían necesarios para asegurar un aprovechamiento compatible con su regeneración?

• Reto Práctico Profesional:

Diseño de Validación Agroforestal. Proponga un ensayo en bloques que compare C. pittieri con una especie de sombra local ya validada y un control sin árbol. Defina espaciamiento inicial, variables de sombra, supervivencia, crecimiento del cultivo, suelo y biodiversidad; no escale el uso hasta demostrar compatibilidad ecológica y productiva.

8.9. Referencias Bibliográficas

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). Calliandra pittieri Standl. *Plants of the World Online.* Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:42259-2

Govaerts, R., Nic Lughadha, E., Black, N., Turner, R., & Paton, A. (2021). The World Checklist of Vascular Plants, a continuously updated resource for exploring global plant diversity. *Scientific Data,* 8, 215. https://doi.org/10.1038/s41597-021-00997-6

Leython, S. (2010). Estudio morfológico de semillas del género Calliandra Benth. *Acta Botánica Venezuelica*, 33(1). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0084-59062010000100004

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 9: *Inga feuilleei DC.* (Pacay / Guaba de Cajón)



Inga feuilleei DC. (Pacay / Guaba de Cajón)

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

9.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Red Agroforestal de Inga feuilleei: Propagación Vegetativa y Valorización Nutracéutica en el Geoparque Imbabura.

• Matriz de Priorización de Alternativas:

La especie se prioriza por su doble utilidad: actúa como sombra estructural en arreglos agroforestales y provee frutos comestibles. Técnicamente, su aprovechamiento puede complementarse con métodos probados de propagación vegetativa, sin asumir un comportamiento universal de almacenamiento de semillas que no haya sido validado por procedencia (acodos aéreos y estacas), (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Hipótesis de mercado y validación comercial:

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. La demanda local y regional se enfoca en el consumo del fruto fresco (pacay), el cual posee nutrientes y compuestos bioactivos caracterizados. Adicionalmente, el establecimiento de parcelas agroforestales consolida el mercado de servicios ecosistémicos (fijación de carbono a escala de sistema), (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. El borrador propone como escala inicial una producción sostenida en vivero de 2,000 clones viables anuales y aprovechamiento de 4 toneladas de fruta en parcelas establecidas para justificar los costos de la planta modular de postcosecha.

9.1.1. Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

9.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

• Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-

- Problema Central: Dificultad en la reproducción forestal por pérdida de viabilidad de semillas y baja rentabilidad de monocultivos de ciclo corto.

- Causas Directas: Ausencia de un protocolo local de conservación de semillas validado por procedencia y falta de viveros clonales capacitados.

- Efectos: Limitada adopción de la especie en la agroforestería local y desaprovechamiento de sus beneficios nutricionales. (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021)

• Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:

- Objetivo Central: Integrar a I. feuilleei en cadenas bioeconómicas locales mediante propagación vegetativa segura y agroforestería.

- Medios: Instalación de viveros clonales para acodos aéreos, validación de tolerancia hídrica in situ, y caracterización nutracéutica.

- Fines: Sistemas agroforestales resilientes, captura de carbono a escala de sistema y diversificación dietética comunitaria (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

9.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Aumentar la resiliencia climática y alimentaria en los agroecosistemas del Geoparque Imbabura.

• Propósito: Parcelas agroforestales con I. feuilleei establecidas mediante propagación vegetativa y produciendo frutos con composición nutricional y compuestos bioactivos caracterizados, cuya comercialización no implica atribuciones clínicas (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Componentes (Resultados): 1. Vivero de propagación clonal (estacas y acodos) operativo. 2. Unidades agroforestales monitoreadas (carbono y biomasa). 3. Línea poscosecha de pacay implementada (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Actividades: Aplicación de acodos aéreos en árboles plus locales (referencia experimental de hasta 100% de enraizamiento por acodo aéreo bajo condiciones específicas del estudio, que debe replicarse localmente antes de adoptarse como meta); medición de carbono en parcelas multiespecíficas (Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Número de clones exitosos trasladados a campo; toneladas de carbono reportadas a escala del sistema agroforestal andino (Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021.)

• Supuestos y Riesgos: La adaptación climática de la especie a las zonas más secas del valle debe validarse, ya que su registro primario corresponde a biomas húmedos (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.).

9.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-: La intervención no asume adaptaciones extremas a la sequía sin datos. El bucle exige medir la supervivencia, el potencial hídrico y las propiedades del suelo en las parcelas de establecimiento antes de escalar la siembra.

• Flujo conceptual de procesos (Propagación y Valorización):

1. Vivero Clonal: Aplicación de técnica de acodo aéreo y estacas semileñosas evaluando el manejo de humedad y uso de auxinas.
2. Agroforestería: Siembra interespecífica para conformar sistemas de sombra.
3. Reciclaje de Biomasa: Las podas de dosel se reincorporan como cobertura (mulch) para retención hídrica.
4. Cosecha y Nutracéutica: Extracción de pulpa del fruto (rica en compuestos bioactivos). Cero atribuciones clínicas sin estudios formales (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Requerimientos Tecnológicos: Infraestructura de propagación con control de humedad relativa, herramientas de marcottage y equipos de despulpado en frío.

9.5. Evaluación Financiera y Económica

• Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales):

- Inversión Inicial (CAPEX): $14,000 USD (Invernaderos para clones, herramientas de acodo, planta básica de procesamiento de fruta).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $6,000 USD (Insumos de propagación, mano de obra local, monitoreo de parcelas).

- Proyección de Ventas (Anual): Ingresos por venta de plantones clonales certificados, fruta fresca y pulpa nutracéutica estimados en $12,500 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

• Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

9.5.1. Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

9.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

• Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Supeditado a la validación ecofisiológica local; no forzar la especie en zonas áridas incompatibles que requieran riego externo insostenible.

- Piso Social: Reforzar la soberanía alimentaria mediante la reintroducción de un fruto de alto valor nutritivo en las dietas rurales (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026).

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Diseño de agroecosistemas donde las podas no se queman, sino que nutren el suelo, y el secuestro de

carbono se monitorea a nivel de todo el arreglo productivo (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Género, Inclusión y Generacional: Involucrar asociaciones de agricultores locales en la identificación de "árboles madre" productivos para la extracción de acodos, protegiendo sus saberes empíricos de manejo de copa.

9.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

• Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Secuestro de carbono verificado a escala de sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores andinos, y protección de suelos mediante el uso de podas como cobertura (Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Generación de capacidades técnicas (know-how) en las comunidades para la propagación clonal compleja (estacas y acodos aéreos), independizándolos de la compra de semillas de dudosa viabilidad (Brennan & Mudge, 1998).

• Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Mejora de la rentabilidad global de fincas (ej. cafetaleras) al combinar la cosecha principal con la venta de pacay como PFNM de alto valor nutricional (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026).

9.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

• Conclusiones del Perfil:

La viabilidad bioeconómica de Inga feuilleei en Imbabura depende del rigor operativo. Al evitar supuestos no probados sobre su tolerancia al déficit hídrico extremo o la fijación estandarizada de carbono individual, el proyecto se blinda basándose en propagación vegetativa demostrada (acodos al 100% de éxito) y el aprovechamiento de un fruto científicamente respaldado por sus bioactivos

(Cotacallapa-Sucapuca et al., 2026; Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Preguntas de Metacognición y Debate:

1. ¿Qué riesgos de diversidad genética tendría establecer un sistema agroforestal con clones de un único árbol madre de I. feuilleei y cómo diseñaría una estrategia de procedencias múltiples?
2. ¿Cómo diseñaría una cadena logística de semillas de Inga feuilleei que permita medir pérdida de viabilidad durante transporte y almacenamiento antes de fijar límites operativos de tiempo y humedad? (Brennan & Mudge, 1998; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Reto Práctico Profesional:

Estructuración de Vivero Clonal. A partir de Brennan y Mudge (1998), diseñe un protocolo piloto de estacas foliosas y acodos aéreos de I. feuilleei. Identifique qué variables del estudio original deben mantenerse, cuáles deben recalibrarse para Imbabura y qué criterio de éxito usaría antes de escalar la producción (Brennan & Mudge, 1998).

9.9. Referencias Bibliográficas

Cotacallapa-Sucapuca, M., Cámara, R. M., Ciudad-Mulero, M., Serruto-Medina, G., Vilca-Curo, R., Arribas, C., Pedrosa, M. M., Morales, P., & Cámara, M. (2026). Nutrients and Bioactive Compounds in Peruvian Pacay (Inga feuilleei D.C.). *Foods*, 15(2), 278. https://doi.org/10.3390/foods15020278

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Inga feuilleei DC.* Plants of the World Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:128507-2

Brennan, E. B., & Mudge, K. W. (1998). Vegetative propagation of Inga feuillei from shoot cuttings and air layering. *New Forests*, 15(1), 37–51. https://doi.org/10.1023/A:1006594207046

Añazco-Romero, M., & Fernández-Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los

Andes del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 32–42. https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1089

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 10: *Inga insignis Kunth* (Guaba de Zorro)



Inga insignis Kunth (Guaba de Zorro)

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Pennington, 1997; Villamar Flores, 2015; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

10.1. IDENTIFICACIÓN DEL BIOEMPRENDIMIENTO Y MERCADO (Visibilidad Comercial)

Título del Proyecto: Laboratorio Comunitario de Micropropagación in vitro de Inga insignes para Sistemas Agroforestales en el Geoparque Imbabura.

• Matriz de Priorización de Alternativas:

La selección biobasada prioriza la superación de un obstáculo biológico crítico: la rápida pérdida de viabilidad de las semillas del género Inga. Técnicamente, se justifica la creación de un centro de biotecnología local para micropropagación in vitro a partir de yemas, evitando depender de un banco de semillas ineficaz. Ambientalmente, fomenta la sombra agroforestal y la mitigación climática (Villamar Flores, 2015; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021; Pennington, 1997).

• Hipótesis de mercado y validación comercial:

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. Mercado potencial de plantones libres de patógenos y genéticamente vigorosos para el establecimiento de fincas cafetaleras y sistemas silvopastoriles en la región interandina. Además de los servicios ecosistémicos, el fruto fresco es un PFNM apreciado en mercados locales.

• Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. El borrador propone como escala inicial la producción y comercialización de 5,000 vitroplantas anuales y consolidación de acuerdos de venta anticipada con cooperativas cafetaleras para sostener los costos fijos del laboratorio de cultivo de tejidos.

10.1.1. Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

10.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

• Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-

- Problema Central: Escasez de germoplasma viable de I. insignes para programas de agroforestería debido a la mortalidad acelerada de sus semillas.

- Causas Directas: Ausencia de laboratorios locales de biotecnología y asunción de supuestos ecológicos erróneos sobre su almacenamiento.

- Efectos: Dependencia de plántulas de mala calidad, fracaso en las tasas de prendimiento forestal, y menor fijación de carbono a nivel de sistema agrícola (Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:

- Objetivo Central: Garantizar el suministro de material de propagación seleccionado por criterios explícitos y trazables de I. insignis mediante el establecimiento de una plataforma biotecnológica comunitaria de micropropagación.

- Medios: Instalación de laboratorio de cultivo de tejidos comunitarios, capacitación en protocolos de descontaminación de yemas con NaClO, y viveros de aclimatación.

- Fines: Sistemas agroforestales andinos dotados de sombra de calidad, y captura de carbono certificable a escala de sistema (Villamar Flores, 2015; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

10.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Incrementar la resiliencia productiva y climática de las asociaciones agroforestales del Geoparque Imbabura mediante el Desarrollo Regenerativo.

• Propósito: Laboratorio de biotecnología comunitaria operando un protocolo validado de micropropagación in vitro para I. insignes (Villamar Flores, 2015).

• Componentes (Resultados): 1. Protocolo in vitro estandarizado en medios MS con BAP. 2. Personal técnico comunitario capacitado. 3. Parcelas agroforestales monitoreadas para fijación de carbono (Villamar Flores, 2015; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Actividades: Recolección de yemas en árboles de procedencia documentada; descontaminación y establecimiento in vitro; trasplante a fase de endurecimiento en vivero (Villamar Flores, 2015).

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Tasa de viabilidad y descontaminación in vitro (meta: 90% de éxito); toneladas de carbono estimadas mediante inventarios a escala del sistema agroforestal (Villamar Flores, 2015; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Supuestos y Riesgos: Las proyecciones de idoneidad climática futura deben respaldarse en mediciones in situ de humedad y suelo, no en modelos globales sin validación local.

10.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-: El bucle cibernético reduce la dependencia de la disponibilidad inmediata de semilla mediante micropropagación, sin asumir que el almacenamiento sea imposible en todas las procedencias. La información de los mejores genotipos (árboles madre) se retroalimenta al laboratorio, se multiplica in vitro, y retorna al campo como plantones robustos, cuya supervivencia se monitorea continuamente (Villamar Flores, 2015).

• Flujo conceptual de procesos (Micropropagación):

1. Acopio: Selección de yemas apicales y axilares de árboles plus.
2. Desinfección: Protocolo estandarizado utilizando Hipoclorito de Sodio (NaClO) al 1.5% durante 15 minutos.
3. Establecimiento: Introducción de las yemas en medio de cultivo MS (Murashige y Skoog) suplementado con la hormona BAP.
4. Multiplicación y Enraizamiento: Desarrollo de brotes en cámaras de crecimiento estériles.
5. Aclimatación: Traslado de vitroplantas a sustratos de vivero microporosos antes de su plantación definitiva en sistemas de café o pasturas (Villamar Flores, 2015).

• Requerimientos Tecnológicos: Cámaras de flujo laminar, autoclaves, reactivos analíticos, fitohormonas e infraestructura de invernadero con control de humedad relativa.

10.5. Evaluación Financiera y Económica

• Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales):

- Inversión Inicial (CAPEX): $24,500 USD (Laboratorio básico de cultivo de tejidos vegetales y vivero de aclimatación).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $11,500 USD (Reactivos químicos, energía eléctrica, personal técnico especializado).

- Proyección de Ventas (Anual): Suministro de vitroplantas certificadas a gran escala y asesoría agroforestal, estimadas en $18,500 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

• Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

10.5.1. Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

10.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

• Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: El proyecto se fundamenta en la precaución: no asume que I. insignes tolerará aridisoles extremos o sequías severas sin evidencia, ubicando las parcelas agroforestales en pisos climáticos comprobados, respetando su afiliación original a biomas tropicales.

- Piso Social: Transferencia de biotecnología avanzada a asociaciones campesinas, descentralizando el acceso a germoplasma de calidad (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Las podas de manejo de los árboles maduros en las fincas cafetaleras se reciclan íntegramente como abono verde y leña dendroenergética.

• Género, Inclusión y Generacional: Formación de jóvenes mujeres del sector rural en técnicas de laboratorio y biotecnología vegetal, rompiendo brechas de género en la investigación técnica dentro del Geoparque Imbabura.

10.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

• Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Fijación de carbono comprobable a escala de sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores andinos, incrementando la biomasa integral del paisaje (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Soberanía tecnológica de las comunidades, que dejan de depender de proyectos gubernamentales centralizados o viveros foráneos para obtener plantas resilientes.

• Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Desarrollo de un nuevo sector productivo (bienes y servicios biotecnológicos) que eleva las capacidades laborales y la retención del talento joven en sus lugares de origen.

10.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

• Conclusiones del Perfil:

La viabilidad de I. insignes descansa en la honestidad científica y el ajuste tecnológico. Al retirar supuestos erróneos sobre la persistencia de sus semillas o su tolerancia universal a la sequía extrema, el bioemprendimiento recurre inteligentemente a la micropropagación in vitro para asegurar la conservación del germoplasma y fortalecer los sistemas agroforestales andinos con plantas vigorosas (Villamar Flores, 2015; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Preguntas de Metacognición y Debate:

1. Si la tolerancia a la desecación de las semillas de I. insignes provoca pérdida rápida de viabilidad, ¿qué experimento diseñaría para definir un protocolo de almacenamiento seguro a corto plazo mientras se escala el laboratorio in vitro?
2. ¿Por qué una decisión de restauración no debería basarse únicamente en una cifra individual de carbono, y por qué es más preciso medir la fijación a escala del sistema agroforestal completo? (Villamar Flores, 2015; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021).

• Reto Práctico Profesional:

Diseño de Inventario de Carbono Agroforestal. Para una finca cafetalera de 15 ha, proponga un muestreo que permita estimar densidad arbórea, DAP, altura y biomasa de la matriz de sombra de Inga insignes. Indique qué ecuación alométrica usaría, cómo reportaría incertidumbre y por qué no atribuiría al sistema una tasa de carbono tomada de otra parcela sin recalibración local. (Royal Botanic Gardens, Kew, s. f.; Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021)

10.9. Referencias Bibliográficas

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Inga insignis Kunth*. Plants of the World Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:128550-2

Pennington, T. D. (1997). The genus Inga: Botany. Royal Botanic Gardens, *Kew.* https://shop.kew.org/the-genus-inga-botany

Villamar Flores, L. A. (2015). Estandarización de las etapas de micropropagación in vitro de la guaba (Inga insignis) endémica de la provincia de Imbabura.

Repositorio Ecuatoriano de Investigación (REDI/CEDIA). https://redi.cedia.edu.ec/document/58850

Añazco-Romero, M., & Fernández-Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 32–42. https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1089

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 11: *Spondias purpurea L.* (Ovo / Jocote)



Spondias purpurea L. (Ovo / Jocote)

- **Base científica verificada**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

11.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Biorrefinería Poscosecha y Red Silvopastoril de Spondias purpurea con Empaques Botánicos en Ambuquí.

• Matriz de Priorización de Alternativas:

Su priorización se sustenta en la rentabilidad histórica documentada en las localidades estudiadas de sus frutos en el Valle de Ambuquí, lo que sugiere un incentivo económico para conservar árboles productivos; su efecto real sobre decisiones de uso del suelo debe evaluarse. Silviculturalmente, la propagación vegetativa y el manejo en condiciones secas deberán validarse localmente; no se atribuyen mecanismos anatómicos de tolerancia extrema sin una fuente específica (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

• Hipótesis de mercado y validación comercial:

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. La fruta fresca posee una alta demanda estacional y un valor nutracéutico destacado (74 kcal/100g y 48 mg de Vitamina C/100g). Sin embargo, la naturaleza climatérica del fruto provoca una rápida senescencia a temperatura ambiente, lo que exige derivar los excedentes de oferta hacia una línea de productos procesados (vinos, mermeladas, vinagres) para estabilizar los precios (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

• Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso,

precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad. Procesamiento de 5 toneladas anuales de fruta en la planta de fermentación y despulpado para compensar la caída estacional de precios y cubrir los costos operativos de la infraestructura comunitaria.

11.1.1. Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

11.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

• Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-

- Problema Central: Alta pérdida económica por senescencia poscosecha del fruto y vulnerabilidad estructural del árbol por manejo inadecuado.

- Causas Directas: Ausencia de agroindustria local para procesar picos de cosecha, y presencia de epífitas como Tillandsia recurvata, cuya gestión debe justificarse caso por caso.

- Efectos: Mermas de producto, caída de ingresos en el mercado fresco y mortalidad de árboles maduros (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

• Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:

- Objetivo Central: Establecer un manejo agroforestal optimizado (poda de enanismo) acoplado a una biorrefinería de productos poscosecha.

- Medios: Capacitación en podas estructurales, limpieza manual de epífitas e instalación de una planta de procesamiento de vinos y mermeladas.

- Fines: Extensión de la vida de anaquel, diversificación de ingresos e incremento de la biomasa frutal (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

11.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Fomentar el Desarrollo Regenerativo y la estabilidad económica en los etnopaisajes andinos de Imbabura.

• Propósito: Cadena de Spondias purpurea operando con mínima pérdida poscosecha, bajo esquemas silviculturales de enanismo y empaques "cero residuos" como objetivo de diseño. (Mohammed et al., 2019)

• Componentes (Resultados): 1. Red de parcelas con poda de enanismo establecida. 2. Biorrefinería comunitaria (línea de fermentación) operativa. 3. Modelo de embalaje botánico estandarizado.

• Actividades: Propagación agámica por estacas leñosas de genotipos élite; manufactura de cestas con hojas de penco; formulación y embotellado de vinos artesanales (Macía & Barfod, 2000).

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Porcentaje de prendimiento de estacas determinado en el ensayo local; volumen (litros) de licor/vino producido; porcentaje de reducción de mermas poscosecha (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

• Supuestos y Riesgos: Brotes incontrolados de mosca de la fruta (Anastrepha spp., Ceratitis capitata) que exijan implementación de control biológico con parasitoides.

11.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-: El manejo se acopla a la biocibernética del árbol: se aplica una poda de enanismo rigurosa para frenar el crecimiento apical, inducir ramificación baja y evitar que el peso de los frutos o epífitas quiebre la madera frágil, optimizando

simultáneamente la ergonomía de la cosecha manual (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

• Flujo conceptual de procesos (Biorrefinería Poscosecha):

1. Manejo Silvícola: Multiplicación por estacas de "árboles madre" y limpieza fitosanitaria manual de Tillandsia recurvata.
2. Cosecha: Recolección manual en estado de madurez fisiológica.
3. Ruta Comercial Directa (Cero Residuos): Embalaje de fruta fresca en bioplásticos naturales (hojas de banano o penco - Fourcraea andina) remachados con espinas de Acacia macracantha.
4. Ruta de Valorización: Despulpado de excedentes y fermentación controlada para la producción de vinagres orgánicos, licores y mermeladas, extendiendo la rentabilidad a lo largo del año (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

• Requerimientos Tecnológicos: Tanques de fermentación de acero inoxidable, despulpadoras mecánicas en frío, refractómetros y cuartos fríos de estabilización.

11.5. Evaluación Financiera y Económica

• Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales actualizados):

- Inversión Inicial (CAPEX): $16,000 USD (Línea de despulpado, fermentadores y adecuación de centros de acopio en Ambuquí).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $7,000 USD (Mano de obra para poda de enanismo, control fitosanitario, manufactura de empaques nativos).

- Proyección de Ventas (Anual): Comercialización combinada de fruta premium empacada ecológicamente y derivados agroindustriales por $15,500 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

• Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

11.5.1. Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

11.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

• Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Minimización de la huella hídrica y plástica. La fenología y tolerancia hídrica de S. purpurea deberán documentarse localmente; no se asume un mecanismo de reserva parenquimática sin evidencia específica. El modelo prescinde por completo de los plásticos de un solo uso.

- Piso Social: Fortalecimiento de la "Fiesta del Ovo" en Ambuquí como epicentro de cohesión identitaria afroecuatoriana y mestiza (Macía & Barfod, 2000).

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Reducción drástica del desperdicio alimentario (food waste) transformando la fruta perecedera en vino y vinagre; uso inter-específico para empaque orgánico (Fourcraea andina y Acacia macracantha), (Macía & Barfod, 2000).

• Género, Inclusión y Generacional: La transmisión intergeneracional de saberes silviculturales (técnicas de estaquillado, podas y acopio) se materializa durante las festividades locales, asegurando la continuidad del patrimonio.

11.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

• Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Consolidación de bancos de germoplasma in situ. La cobertura arbórea puede aportar funciones de suelo y hábitat que deberán cuantificarse localmente; no se atribuyen tasas de control de erosión ni beneficios a polinizadores sin mediciones.

• Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Institucionalización de la "Fiesta del Ovo" como modelo de economía botánica y educación del Geoparque Imbabura, dignificando el conocimiento campesino (Macía & Barfod, 2000).

• Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Multiplicación de la vida útil del producto (de días a años mediante fermentación), estabilizando el ingreso de los agricultores y eliminando la dependencia de intermediarios durante los picos de cosecha.

11.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

• Conclusiones del Perfil:

Spondias purpurea es un bastión de la biocibernética regenerativa andina. Al integrar su propagación vegetativa y manejo de copa que deberán validarse bajo condiciones locales, y sumar un procesamiento poscosecha junto a empaques botánicos sin plástico, el proyecto propone evaluar si la conservación del bosque seco es profundamente rentable y socio-culturalmente transformadora (Mohammed et al., 2019).

• Preguntas de Metacognición y Debate:

1. ¿Qué evidencia económica, cultural y ambiental sería necesaria para evaluar si una festividad asociada al ovo puede contribuir responsablemente a la bioeconomía y educación del Geoparque?

2. Considerando que Macía y Barfod documentaron la presencia y manejo de Tillandsia recurvata en los huertos estudiados, ¿qué información fitosanitaria y de seguridad sería necesaria antes de recomendar cualquier intervención sobre epífitas u otros organismos asociados a S. purpurea? (Macía & Barfod, 2000).

• Reto Práctico Profesional:

Bioeconomía y Reducción de Pérdidas. Diseñe el flujo logístico para comercializar 500 kg de ovo desde Ambuquí. Compare al menos dos alternativas de empaque y conservación mediante criterios de pérdida poscosecha, inocuidad, costo, huella material y disponibilidad local, evitando declarar "cero residuos" como objetivo de diseño sin un balance verificable (Macía & Barfod, 2000; Mohammed et al., 2019).

11.9. Referencias Bibliográficas

Macía, M. J., & Barfod, A. S. (2000). Economic botany of Spondias purpurea (Anacardiaceae) in Ecuador. *Economic Botany,* 54(4), 449–458. https://doi.org/10.1007/BF02866544

Mohammed, M., Bridgemohan, P., Graham, O., Wickham, L., Bridgemohan, R. S. H., & Mohammed, Z. (2019). Postharvest Physiology, Biochemistry and Quality Management of Chili Plum (Spondias purpurea var. Lutea): A Review. *Journal of Food Research*, 8(3), 1–15. https://doi.org/10.5539/jfr.v8n3p1

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Capítulo 12: *Cynophalla didymobotrys* (Ruiz & Pav. ex DC.) *Cornejo & Iltis* (Quebrajacho)



Cynophalla didymobotrys (Ruiz & Pav. ex DC.) *Cornejo & Iltis* (Quebrajacho)

- **Base científica**

Las fuentes retenidas para este perfil fueron cotejadas con DOI, editoriales científicas o repositorios institucionales. Citas de control: (Cornejo & Iltis, 2006; Mercado Gómez et al., 2020; Instituto Nacional de Biodiversidad del Ecuador [INABIO], s. f.).

12.1. Identificación del Bioemprendimiento y Mercado

Título del Proyecto: Vivero Experimental y Documentación Biocultural de Cynophalla didymobotrys para la Restauración del Geoparque Imbabura.

• Matriz de Priorización de Alternativas:

La intervención no se plantea como una explotación extractiva tradicional, sino bajo un enfoque precautorio de investigación y salvaguarda. Técnicamente, prioriza la resolución de vacíos de información sobre germinación y tolerancia a desecación de sus semillas. Socialmente, prioriza la validación etnobotánica de su uso maderable.

• Hipótesis de mercado y validación comercial:

Los segmentos descritos son hipótesis comerciales del perfil, no una demanda cuantificada. Antes de invertir deberán validarse mediante entrevistas a compradores, precios, volúmenes, especificaciones de calidad, requisitos regulatorios y análisis de competencia. El mercado inmediato se basa en la economía del conocimiento y los servicios ecosistémicos: financiamiento de fondos de conservación para el conservación y generación de conocimiento sobre especies nativas y fomento del geoturismo cultural (la "Bomba del Chota") amparado en el Desarrollo Regenerativo.

• Hipótesis de escala mínima y punto de equilibrio (por validar):

La cifra se conserva como supuesto de diseño del perfil; no es un punto de equilibrio demostrado. Debe recalcularse con rendimiento real del proceso, precio de venta, costos unitarios, capacidad efectiva, mermas y estacionalidad.

El borrador propone financiar las operaciones del vivero piloto mediante grants de investigación y venta anticipada de plantones para ensayos agroforestales, estimando la producción de 1,500 plantas anuales para cubrir los OPEX básicos.

12.1.1 . Puerta de validación comercial

No escalar CAPEX ni comprometer cuotas de extracción hasta completar: oferta biológica local, estudio de mercado, especificaciones del comprador, requisitos regulatorios y prueba piloto de rendimiento.

12.2. Análisis Estructural del Sistema

Nota de lectura: el árbol de problemas funciona como hipótesis causal para orientar la línea base. Sus causas y efectos deberán comprobarse con datos biofísicos, sociales y económicos del territorio.

• Árbol de problemas -hipótesis causal para validar mediante línea base-

- Problema Central: Vacíos de información sobre el manejo silvicultural y el estado poblacional real del quebracho en los relictos del bosque seco interandino.

- Causas Directas: Ausencia de protocolos de almacenamiento para semillas cuyo comportamiento frente a desecación y almacenamiento todavía debe determinarse experimentalmente y falta de documentación formal sobre su uso artesanal.

- Efectos: Riesgo de pérdida de germoplasma por un manejo de vivero inadecuado y posible erosión del patrimonio inmaterial afroecuatoriano. (Mercado Gómez et al., 2020)

• Árbol de objetivos -teoría de cambio propuesta-:

- Objetivo Central: Desarrollar una agenda de conservación basada en la propagación experimental y la investigación biocultural documentada.

- Medios: Diseño de ensayos de vivero (humedad, desecación), inventarios de nectarios extra florales y encuestas etnobotánicas.

- Fines: Restauración poblacional informada, protección de saberes y validación de interacciones ecológicas locales.

12.3. Matriz de Marco Lógico Biocibernético

Nota de lectura: los indicadores y metas de esta matriz son compromisos propuestos del proyecto; no representan resultados ya observados.

• Fin: Asegurar la resiliencia de la biodiversidad nativa y el patrimonio cultural del Geoparque Imbabura mediante el Desarrollo Regenerativo.

• Propósito: Protocolos silviculturales y bioculturales de C. didymobotrys estandarizados y validados con las comunidades locales.

• Componentes (Resultados): 1. Protocolo de manejo de semillas y vivero experimental publicado. 2. Inventario local de interacciones planta-hormiga documentado. 3. Informe etnobotánico sobre maderas resonantes validado.

• Actividades: Recolección de semillas para pruebas de desecación; monitoreo entomológico en nectarios extra florales locales; entrevistas estructuradas a artesanos de instrumentos musicales.

• Indicadores Objetivamente Verificables (IOV): Porcentaje de supervivencia de semillas bajo distintos grados de humedad; número de taxones de hormigas identificados in situ; catálogo de usos etnobotánicos verificado.

• Supuestos y Riesgos: Dificultad logística para asegurar el procesamiento inmediato de semillas tras su recolección en campo, por lo que se priorizará un diseño logístico que mida explícitamente la viabilidad en función del tiempo desde la colecta.

12.4. Ingeniería y Bucle Biocibernético de La Biorrefinería

Nota de ingeniería: el flujo descrito es conceptual. Antes de operación requiere balances de masa y energía, rendimiento de proceso, especificaciones de producto, seguridad, gestión de residuos y validación piloto.

• Criterios del bucle biocibernético -reglas de diseño sujetas a validación-: El bucle cibernético opera como un sistema de "medir antes de intervenir". Cualquier escalamiento agroforestal o comercialización maderera está bloqueada hasta que los datos de campo verifiquen la viabilidad del

almacenamiento seminal y se documenten los usos locales sin asumir roles preconcebidos.

• Flujo conceptual de procesos (Validación Científico-Cultural):

1. Vi verismo Experimental: Pruebas de germinación controlada evaluando sustratos, tiempo de almacenamiento y tolerancia a la desecación de los embriones.
2. Ecología de Campo: Cuantificación in situ de las dimensiones de los nectarios y concentración de carbohidratos para evaluar el potencial de control biológico con hormigas nativas.
3. Antropología Botánica: Rastreo del material utilizado para la "Bomba del Chota", identificando botánicamente si la madera del quebrajacho es efectivamente el insumo base.
4. Reincorporación: Propagación de los individuos obtenidos hacia parcelas de exclusión para monitorear su rol como especie nodriza.

• Requerimientos Tecnológicos: Cámaras de germinación, medidores de humedad de semillas, herramientas de identificación entomológica y botánica.

12.5. Evaluación Financiera y Económica

• Escenario financiero base del perfil -supuestos no cotizados- (Valores Referenciales del Piloto):

- Inversión Inicial (CAPEX): $11,000 USD (Equipamiento de vivero experimental, instrumentos de medición en campo y botánica).

- Costos Operativos (OPEX Anual): $4,800 USD (Becas de investigación comunitaria, insumos de propagación, logística).

- Proyección de Ventas (Anual): Cofinanciamiento mediante fondos internacionales de conservación del patrimonio y venta de plantones certificados por $8,000 USD.

Nota de auditoría: estas cifras son supuestos editoriales de prefactibilidad y no sustituyen cotizaciones, estudio de mercado ni presupuesto de ingeniería.

• Indicadores financieros a recalcular en prefactibilidad:

La versión de imprenta no presenta VAN, TIR ni relación B/C como resultados demostrados porque los perfiles originales no contienen un flujo de caja anual reproducible. En la siguiente fase deberán calcularse con un modelo explícito que incorpore ramp-up, capital de trabajo, impuestos, reposición de equipos, contingencias, valor residual y análisis de sensibilidad de precios, rendimientos y volúmenes.

12.5.1. Control financiero para editorial

Los montos conservados son supuestos del perfil original. La decisión de inversión requiere un archivo financiero trazable con fórmulas, fuentes de precios y sensibilidad; por ello la edición no presenta los VAN/TIR originales como evidencia.

12.6. Modelos Económicos Alternativos y Enfoque de Derechos

Nota de gobernanza: los modelos económicos, derechos e inclusión se presentan como criterios de diseño institucional; su cumplimiento deberá demostrarse con acuerdos, indicadores y mecanismos de rendición de cuentas.

• Economía de la Dona (Doughnut Economics):

- Techo Ecológico: Garantizado al eliminar el supuesto extractivista; el proyecto exige levantar una línea base de abundancia, distribución y amenazas locales antes de asignar categorías de riesgo universales o cuotas de uso.

- Piso Social: Visibilizar formalmente a las comunidades afroecuatorianas (Juncal, Carpuela, Ambuquí) integrándolas en el diseño experimental, documentando sus saberes bajo estrictos protocolos de consentimiento informado.

• Criterios de Bioeconomía y Economía Circular: Reducción del desperdicio de esfuerzos de reforestación al asegurar que las plántulas se adapten al estrés hídrico mediante protocolos de endurecimiento probados.

• Género, Inclusión y Generacional: El levantamiento etnobotánico prioriza la participación de los adultos mayores (portadores de la tradición de la Bomba del Chota) como co-autores del conocimiento generado.

12.7. Matriz de Impactos: Social, Económico y Ambiental

Nota de impacto: los impactos listados son efectos esperados y constituyen hipótesis de evaluación. La línea base y el sistema de monitoreo deberán definir indicadores, contrafactuales o comparadores y frecuencia de medición.

• Impacto ambiental esperado -a medir, no observado todavía-:

Protección directa de la diversidad genética de C. didymobotrys al desarrollar técnicas que permitan establecer, sin asumir de antemano recalcitrancia, qué condiciones conservan la viabilidad y favorecen la propagación.

• Impacto social esperado -a medir, no observado todavía-:

Salvaguarda del patrimonio inmaterial ecuatoriano al investigar con identificación botánica y consentimiento informado si existe una relación documentable entre la especie y prácticas artesanales o musicales afroandinas. (Mercado Gómez et al., 2020)

• Impacto económico esperado -a medir, no observado todavía-:

Sentar las bases técnicas para que futuras biorrefinerías o aprovechamientos (una vez validados) no incurran en pérdidas financieras por desconocimiento fisiológico de la especie.

12.8. Cierre Analítico y Aparato Pedagógico

• Conclusiones del Perfil:

Cynophalla didymobotrys representa el desafío definitivo de la biocibernética regenerativa. La integridad del perfil radica en no comercializar lo que aún no se comprende plenamente. Al estructurar un vivero experimental y una investigación biocultural rigurosa, el proyecto transforma la ignorancia silvicultural en una agenda auditable de Desarrollo Regenerativo para Imbabura.

• Preguntas de Metacognición y Debate:

1. ¿Qué caracteres y fuentes taxonómicas deberían revisarse para justificar la delimitación de Cynophalla didymobotrys frente a tratamientos alternativos del grupo?

2. Si se confirma la presencia y función de nectarios extraflorales en poblaciones locales, ¿cómo diseñaría un estudio para medir su relación con hormigas, herbivoría y rendimiento de un cultivo asociado antes de valorarlo como servicio ecosistémico? (Cornejo & Iltis, 2006).

• Reto Práctico Profesional:

Estructuración de un Vivero Experimental: Elabore un Manual Operativo Estándar para C. didymobotrys que incluya tratamientos comparativos de humedad, almacenamiento y sustrato, criterios de bioseguridad, registros de supervivencia y una regla para actualizar el protocolo cuando los datos contradigan la hipótesis inicial. (Instituto Nacional de Biodiversidad del Ecuador [INABIO], s. f.).

12.9. Referencias Bibliográficas

Cornejo, X., & Iltis, H. H. (2006). New combinations in Capparaceae sensu stricto for Flora of Ecuador. *Harvard Papers in Botany*, 11(1), 17–18. https://doi.org/10.3100/1043-4534(2006)11[17:NCICSS]2.0.CO;2

Mercado Gómez, J. D., Prieto-Torres, D. A., & Rojas-Soto, O. (2020). Climatic affinities of Neotropical species of Capparaceae. Botanical Journal of the *Linnean Society*, 193(2), 263–275. https://doi.org/10.1093/botlinnean/boz092

Instituto Nacional de Biodiversidad del Ecuador (INABIO). (s. f.). Registros botánicos de Cynophalla didymobotrys en Ecuador. *Base de datos institucional.* Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://bndb.sisbioecuador.bio/bndb/collections/list.php?taxa=5227&usethes=1

Control de integridad: las fuentes anteriores fueron retenidas por trazabilidad bibliográfica y pertinencia con las afirmaciones científicas del perfil. Las hipótesis comerciales, financieras o territoriales no se convierten en hechos por el solo hecho de figurar en este documento.

Referencias Bibliográficas

Abdelgadir, H. A., & Van Staden, J. (2013). Ethnobotany, ethnopharmacology and toxicity of Jatropha curcas L. (Euphorbiaceae): A review. *South African Journal of Botany*, 88, 204–218. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.07.021

Abdelgadir, H. A., & Van Staden, J. (2013). Ethnobotany, ethnopharmacology and toxicity of Jatropha curcas L. (Euphorbiaceae): *A review*. South African Journal of Botany, 88, 204–218. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2013.07.021

Alves, M., Albuquerque, M. B. de, Pedroza Cruz, R. R., Jardelino Dias, T., & de Medeiros, E. C. (2025). Growth components and gas exchange in Tecoma stans L. plants under water stress. *Comunicata Scientiae*, 16, e4303. https://doi.org/10.14295/cs.v16.4303

Alves, M., Albuquerque, M. B. de, Pedroza Cruz, R. R., Jardelino Dias, T., & de Medeiros, E. C. (2025). Growth components and gas exchange in Tecoma stans L. plants under water stress. *Comunicata Scientiae*, 16, e4303. https://doi.org/10.14295/cs.v16.4303

Anand, M., & Basavaraju, R. (2021). A review on phytochemistry and pharmacological uses of Tecoma stans (L.) Juss. ex Kunth. *Journal of Ethnopharmacology,* 265, 113270. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113270

Anand, M., & Basavaraju, R. (2021). A review on phytochemistry and pharmacological uses of Tecoma stans (L.) Juss. ex Kunth. *Journal of Ethnopharmacology*, 265, 113270. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113270

Añazco-Romero, M., & Fernández-Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 32–42. https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1089

Añazco-Romero, M., & Fernández-Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador. Bosques *Latitud Cero*, 11(2), 32–42. https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1089

Añazco-Romero, M., & Fernández-Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 32–42. https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1089

Añazco-Romero, M., & Fernández-Gómez, N. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores de los Andes del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 32–42. https://doi.org/10.54753/blc.v11i2.1089

Arion, I. D., Morar, I. M., Truța, A. M., Chereches, I. A., Isarie, V. I., & Arion, F. H. (2026). Internet of Things (IoT)-based applications in smart forestry: A conceptual and technological analysis. *Forests,* 17(1), Artículo 44. https://doi.org/10.3390/f17010044

Armijos, C., Ramírez, J., Salinas, M., Vidari, G., & Suárez, A. I. (2021). Pharmacology and Phytochemistry of Ecuadorian Medicinal Plants: *An Update and Perspectives.* Pharmaceuticals, 14(11), 1145. https://doi.org/10.3390/ph14111145

Armijos, C., Ramírez, J., Salinas, M., Vidari, G., & Suárez, A. I. (2021). Pharmacology and Phytochemistry of Ecuadorian Medicinal Plants: An Update and Perspectives. *Pharmaceuticals,* 14(11), 1145. https://doi.org/10.3390/ph14111145

Arroyave, M., Posada, M., Nowak, D., y Hoehn, R. (2019). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia Forestal*, 22(1), 5–16. https://doi.org/10.14483/2256201X.13695

Banco Central del Ecuador. (2025). *Cuenta Satélite de Bioeconomía*. https://contenido.bce.fin.ec/documentos/informacioneconomica/cuentasnacionales/satelites/ix_satelite_bieconomia.html

Beer, S. (1972). Brain of the firm. Allen Lane, *The Penguin Press.*

Beer, S. (1985). Diagnosing the system for organizations. *John Wiley & Sons.*

Benítez, Á., Chalán, J., Tinitana, F., Morocho, V., Armijos, L., & Malagon, O. (2023). Estructura diamétrica de Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch: especie con potencial uso no maderable. *Bosques Latitud Cero*, 13(2), 70–79. https://doi.org/10.54753/blc.v13i2.1658

Benítez, Á., Chalán, J., Tinitana, F., Morocho, V., Armijos, L., & Malagon, O. (2023). Estructura diamétrica de Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch: especie con potencial uso no maderable. *Bosques Latitud Cero*, 13(2), 70–79. https://doi.org/10.54753/blc.v13i2.1658

Benyus, J. M. (1997). Biomimicry: Innovation inspired by nature. William Morrow.

Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2000). Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological Applications*, 10(5), 1251–1262. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1251:ROTEKA]2.0.CO;2

Bose, A., & Keharia, H. (2014). Phorbol ester degradation in Jatropha seedcake using white rot fungi. *3 Biotech*, 4, 447–450. https://doi.org/10.1007/s13205-013-0174-9

Bose, A., & Keharia, H. (2014). Phorbol ester degradation in Jatropha seedcake using white rot fungi. 3 *Biotech,* 4, 447–450. https://doi.org/10.1007/s13205-013-0174-9

Brennan, E. B., & Mudge, K. W. (1998). Vegetative propagation of Inga feuillei from shoot cuttings and air layering. *New Forests*, 15(1), 37–51. https://doi.org/10.1023/A:1006594207046

Brennan, E. B., & Mudge, K. W. (1998). Vegetative propagation of Inga feuillei from shoot cuttings and air layering. *New Forests*, 15(1), 37–51. https://doi.org/10.1023/A:1006594207046

Cabral, A. L., Sales, J. de F., Barbosa, K. F., Rodrigues, A. A., Zuchi, J., Silva, J. M. D., & Vasconcelos Filho, S. C. (2019). Dormancy breakage and germination in Sapindus saponaria L. seeds as a function of temperature

and germination substrate. Semina: *Ciências Agrárias*, 40(6Supl3), 3345–3358. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl3p3345

Cabral, A. L., Sales, J. de F., Barbosa, K. F., Rodrigues, A. A., Zuchi, J., Silva, J. M. D., & Vasconcelos Filho, S. C. (2019). Dormancy breakage and germination in Sapindus saponaria L. seeds as a function of temperature and germination substrate. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(6Supl3), 3345–3358. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl3p3345

Canziani, J. (2009). Ciudad y territorio en los Andes. Fondo Editorial de la *Pontificia Universidad Católica del Perú.*

Cao, X., Wei, X., Shao, Y., Li, D., & Zhu, J. (2025). Jatropha curcas seed oil for possible human consumption: A toxicological assessment of its phorbol esters. *Toxicology Reports*, 14, 101870. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101870

Cao, X., Wei, X., Shao, Y., Li, D., & Zhu, J. (2025). Jatropha curcas seed oil for possible human consumption: A toxicological assessment of its phorbol esters. *Toxicology Reports,* 14, 101870. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101870

Carroll, S. R., Garba, I., Figueroa-Rodríguez, O. L., Holbrook, J., Lovett, R., Materechera, S., Parsons, M., Raseroka, K., Rodriguez-Lonebear, D., Rowe, R., Sara, R., Walker, J. D., Anderson, J., & Hudson, M. (2020). The CARE principles for Indigenous Data Governance. *Data Science Journal,* 19(1), Artículo 43. https://doi.org/10.5334/dsj-2020-043

Carvajal-Benavides, J. G., Chang-Gómez, M. A., Tenazoa-Vasquez, G., Gómez-Tuesta, L., López-Vinatea, L. A., Gómez-Matos, H. J., García-Navarro, M. R., & García-Lino, M. E. (2026). *Transformación Digital para la Sostenibilidad Ambiental. IoT, Big Data y cambio climático*. Oriente-Manabí Editorial. https://doi.org/10.63618/omeditorial/122

Carvajal-Benavides, J. G., Cifuentes-Vásquez, J. K., Villalba-Flores, E. A., Cadena-Cunguan, B. A., Corrales-Pinyui, V. A., & Bastidas-Plaza, E. M. (2025). Planificación Territorial: Hacia una "Cultura Forestal Regenerativa", aplicando proyecto de Educación Ambiental PEA para la

Gestión Urbana Sostenible, cantón Ibarra-Ecuador. *Innova Science Journal, 3*(4), 486-500. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n4/153

Carvajal-Benavides, J. G., Garrido-Aguilar, L. F., Bastidas-Plaza, E. M., Gualoto-Mafla, G. G., Varela-Jácome, G. D., & Rosero-Erazo, R. W. (2025). Gestión regenerativa del fuego en los Andes ecuatorianos: Diagnóstico y validación de un modelo de planificación participativa. *Innova Science Journal,* 3(4), 67–86. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n4/122

Carvajal-Benavides, J. G., Palacios-López, L. A., Paredes-Morán, J. G., Loaiza-Vélez, H. F., Salazar-Cobeña, G. V., Capia-López, J. A. R., Gómez-Matos, H. J., Reategui-Noriega, E. E., Chang-Gómez, M. A., & Marquez-López, M. C. (2026). *Cambio Climático y Desarrollo Sostenible: Adaptación, Mitigación y Resiliencia Territorial*. Oriente-Manabí Editorial. https://doi.org/10.63618/omeditorial/113.

Carvajal-Benavides, J. G., Paredes-Rodríguez, H. O., Quinatoa-Ulcuango, J. K., Villagran-Castañeda, J. E., Farinango-Coyago, M. C., & Tituaña-Maigua, L. S. (2025). Análisis comparativo de atributos dendrológicos y tecnológicos de cinco especies forestales nativas... *Innova Science Journal, 3*(3), 72-96. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/70

Carvajal-Benavides, J. G., Paredes-Rodríguez, H. O., Villalba-Flores, E. A., Cifuentes-Vásquez, J. K., Alemán-Chamorro, Y. E., & Colimba, J. J. (2025). Evaluación Xilológica Multiescala de cinco Especies Forestales Comerciales del Ecuador... *Innova Science Journal, 3*(3), 46-71. https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/69

Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., Jäger, J., & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8086–8091. https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100

Chambi, F., Chirinos, R., Pedreschi, R., Betalleluz-Pallardel, I., Debaste, F., & Campos, D. (2013). Antioxidant potential of hydrolyzed polyphenolic extracts from tara (Caesalpinia spinosa) pods. *Industrial Crops and Products*, 47, 168–175. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.03.009

Chambi, F., Chirinos, R., Pedreschi, R., Betalleluz-Pallardel, I., Debaste, F., & Campos, D. (2013). Antioxidant potential of hydrolyzed polyphenolic extracts from tara (Caesalpinia spinosa) pods. *Industrial Crops* and Products, 47, 168–175. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.03.009

Chazdon, R. L. (2014). Second growth: The promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation. *University of Chicago Press*. https://doi.org/10.7208/chicago/9780226118109.001.0001

Contran, N., Chessa, L., Lubino, M., Bellavite, D., Roggero, P. P., & Enne, G. (2013). State-of-the-art of the Jatropha curcas productive chain: From sowing to biodiesel and by-products. *Industrial Crops and Products*, 42, 202–215. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.037

Contran, N., Chessa, L., Lubino, M., Bellavite, D., Roggero, P. P., & Enne, G. (2013). State-of-the-art of the Jatropha curcas productive chain: From sowing to biodiesel and by-products. *Industrial Crops and Products*, 42, 202–215. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.037

Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M. M., Rincón, A., & Pueyo, J. J. (2016). *Rhizobial diversity,* symbiotic effectiveness and structure of nodules of Vachellia macracantha. Soil Biology and Biochemistry, 96, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.011

Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M. M., Rincón, A., & Pueyo, J. J. (2016). Rhizobial diversity, symbiotic effectiveness and structure of nodules of Vachellia macracantha. *Soil Biology and Biochemistry,* 96, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.011

Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M. M., Rincón, A., & Pueyo, J. J. (2016). Rhizobial diversity, symbiotic effectiveness and structure of nodules of Vachellia macracantha*. Soil Biology and Biochemistry,* 96, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.011

Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Coba de la Peña, T., Balaguer, L., Lucas, M. M., Rincón, A., & Pueyo, J. J. (2016). Rhizobial diversity, symbiotic

effectiveness and structure of nodules of Vachellia macracantha. *Soil Biology* and Biochemistry, 96, 39–54. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.01.011

Cornejo, X., & Iltis, H. H. (2006). New combinations in Capparaceae sensu stricto for Flora of Ecuador. *Harvard Papers in Botany,* 11(1), 17–18. https://doi.org/10.3100/1043-4534(2006)11[17:NCICSS]2.0.CO;2

Cornejo, X., & Iltis, H. H. (2006). New combinations in Capparaceae sensu stricto for Flora of Ecuador. *Harvard Papers in Botany*, 11(1), 17–18. https://doi.org/10.3100/1043-4534(2006)11[17:NCICSS]2.0.CO;2

Costantino, L., Raimondi, L., Pirisino, R., Brunetti, T., Pessotto, P., Giannessi, F., Lins, A. P., Barlocco, D., Antolini, L., & El-Abady, S. A. (2003). Isolation and pharmacological activities of the Tecoma stans alkaloids. *Il Farmaco,* 58(9), 781–785. https://doi.org/10.1016/S0014-827X(03)00133-2

Costantino, L., Raimondi, L., Pirisino, R., Brunetti, T., Pessotto, P., Giannessi, F., Lins, A. P., Barlocco, D., Antolini, L., & El-Abady, S. A. (2003). Isolation and pharmacological activities of the Tecoma stans alkaloids. *Il Farmaco,* 58(9), 781–785. https://doi.org/10.1016/S0014-827X(03)00133-2

Cotacallapa-Sucapuca, M., Cámara, R. M., Ciudad-Mulero, M., Serruto-Medina, G., Vilca-Curo, R., Arribas, C., Pedrosa, M. M., Morales, P., & Cámara, M. (2026). *Nutrients and Bioactive Compounds in Peruvian Pacay* (Inga feuilleei D.C.). Foods, 15(2), 278. https://doi.org/10.3390/foods15020278

Cotacallapa-Sucapuca, M., Cámara, R. M., Ciudad-Mulero, M., Serruto-Medina, G., Vilca-Curo, R., Arribas, C., Pedrosa, M. M., Morales, P., & Cámara, M. (2026). Nutrients and Bioactive Compounds in Peruvian Pacay (Inga feuilleei D.C.). *Foods*, 15(2), 278. https://doi.org/10.3390/foods15020278

Díaz, S. C., Correa Quezada, L., Jiménez Álvarez, L., Loján-Córdova, J., & Carrión-Paladines, V. (2023). Indigenous use of fire in the paramo ecosystem of southern Ecuador: A case study using remote sensing methods and ancestral knowledge of the Kichwa Saraguro people*. Fire Ecology,* 19, Article 5. https://doi.org/10.1186/s42408-022-00164-1

Divakara, B. N., Upadhyaya, H. D., Wani, S. P., & Laxmipathi Gowda, C. L. (2010). Biology and genetic improvement of Jatropha curcas L.: *A review. Applied Energy*, 87(3), 732–742. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.013

Divakara, B. N., Upadhyaya, H. D., Wani, S. P., & Laxmipathi Gowda, C. L. (2010). Biology and genetic improvement of Jatropha curcas L.: *A review*. Applied Energy, 87(3), 732–742. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.013

Escobar, A. (2008). Territories of difference: Place, movements, life, redes. *Duke University Press.*

Espinosa, A., & Duque, C. (2018). Complexity management and multi-scale governance: A case study in an Amazonian Indigenous Association. *European Journal of Operational Research*, 268(3), 1006–1020. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.049

Espinosa, A., Harnden, R., & Walker, J. (2008). A complexity approach to sustainability-Stafford Beer revisited. *European Journal of Operational Research,* 187(2), 636–651. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.03.023

Espinosa, C. I., de la Cruz, M., Luzuriaga, A. L., & Escudero, A. (2012). Bosques tropicales secos de la región Pacífico Ecuatorial: diversidad, estructura, funcionamiento e implicaciones para la conservación. *Ecosistemas,* 21(1–2), 167–179.

Evju, M., Hagen, D., Kyrkjeeide, M. O., & Köhler, B. (2020). Learning from scientific literature: ¿Can indicators for measuring success be standardized in “on the ground” restoration? *Restoration Ecology*, 28(3), 519–531. https://doi.org/10.1111/rec.13149

Ewane, E. B., Mohan, M., Bajaj, S., Galgamuwa, G. A. P., Watt, M. S., Arachchige, P. P., Hudak, A. T., Richardson, G., Ajithkumar, N., Srinivasan, S., Corte, A. P. D., Johnson, D. J., Broadbent, E. N., de-Miguel, S., Bruscolini, M., Young, D. J. N., Shafai, S., Abdullah, M. M., Jaafar, W. S. W. M., Doaemo, W., Silva, C. A., & Cardil, A. (2023). Climate-change-driven droughts and tree mortality: Assessing the potential of UAV-derived

early warning metrics. *Remote Sensing*, 15(10), Artículo 2627. https://doi.org/10.3390/rs15102627

Feeley, K. J., Silman, M. R., Bush, M. B., Farfan, W., Cabrera, K. G., Malhi, Y., Meir, P., Revilla, N. S., Quisiyupanqui, M. N. R., & Saatchi, S. (2011). Upslope migration of Andean trees. *Journal of Biogeography,* 38(4), 783–791. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x

Fischer-Kowalski, M., y Haberl, H. (1998). Sustainable development: Socio-economic metabolism and colonization of nature. *International Social Science Journal,* 50(158), 573–587. https://doi.org/10.1111/1468-2451.00169

Fleischman, F., Basant, S., Chhatre, A., Coleman, E. A., Fischer, H. W., Gupta, D., Güneralp, B., Kashwan, P., Khatri, D., Muscarella, R., Powers, J. S., Ramprasad, V., Rana, P., Solorzano, C. R., & Veldman, J. W. (2020). *Pitfalls of tree planting show why we need people-centered natural climate solutions.* BioScience, 70(11), 947–950. https://doi.org/10.1093/biosci/biaa094

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 30(1), 441–473. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511

Fon-Fay, F. M., Pino, J. A., Hernández, I., Rodeiro, I., & Fernández, M. D. (2019). Chemical composition and antioxidant activity of Bursera graveolens (Kunth) Triana et Planch essential oil from Manabí, Ecuador. *Journal of Essential Oil Research*, 31(3), 211–216. https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1564381

Fon-Fay, F. M., Pino, J. A., Hernández, I., Rodeiro, I., & Fernández, M. D. (2019). Chemical composition and antioxidant activity of Bursera graveolens (Kunth) Triana et Planch essential oil from Manabí, Ecuador. Journal of *Essential Oil Research*, 31(3), 211–216. https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1564381

Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N. G., Ramdane, A., & Cescatti, A. (2022). Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, 608(7923), 534–539. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decleer, K., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration (2.ª ed.). *Restoration Ecology*, 27(S1), S1–S46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

Gao, B.-C. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

Garrido Aguilar, L. F., Carvajal Benavides, J. G., Valencia Valenzuela, X. G., Varela Molina, I. E. M., y Cuarán Guerrero, M. J. (2023). Diagnóstico del arbolado urbano en la ciudad de Ibarra, como base para una gestión de arbolado más humano. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 5613–5632. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5743

Giampietro, M. (2019). On the circular bioeconomy and decoupling: Implications for sustainable growth. *Ecological Economics,* 162, 143–156. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.001

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Govaerts, R., Nic Lughadha, E., Black, N., Turner, R., & Paton, A. (2021). The World Checklist of Vascular Plants, a continuously updated resource for exploring global plant diversity. *Scientific Data*, 8, 215. https://doi.org/10.1038/s41597-021-00997-6

Govaerts, R., Nic Lughadha, E., Black, N., Turner, R., & Paton, A. (2021). The World Checklist of Vascular Plants, a continuously updated resource for exploring global plant diversity. *Scientific Data,* 8, 215. https://doi.org/10.1038/s41597-021-00997-6

Gunderson, L. H., & Holling, C. S. (Eds.). (2002). Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems. *Island Press.*

Gunderson, L. H., y Holling, C. S. (Eds.). (2002). Panarchy: *Understanding transformations in human and natural systems. Island Press.*

Hairiah, K., Widianto, Suprayogo, D., & Van Noordwijk, M. (2020). Tree Roots Anchoring and Binding Soil: *Reducing Landslide Risk in Indonesian Agroforestry.* Land, 9(8), 256. https://doi.org/10.3390/land9080256

Hernández-Jaramillo, A., Pinzón, O. P., & Parrado-Rosselli, Á. (2012). Depredación de las semillas de Sapindus saponaria L. por Leptostylus gibbulosus Bates (Coleoptera: Cerambycidae) y su efecto en la germinación. *Colombia Forestal*, 15(2), 247–260. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a08

Hernández-Jaramillo, A., Pinzón, O. P., & Parrado-Rosselli, Á. (2012). Depredación de las semillas de Sapindus saponaria L. por Leptostylus gibbulosus Bates (Coleoptera: Cerambycidae) y su efecto en la germinación. *Colombia Forestal,* 15(2), 247–260. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a08

Hohenthal, J., & Veintie, T. (2024). Fostering Indigenous young people's socio-environmental consciousness through place-based learning in Ecuadorian Amazonia*. Globalizations*, 21(2), 349–369. https://doi.org/10.1080/14747731.2022.2038831

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. Annual Review *of Ecology and Systematics,* 4, 1–23. https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Ibieta, G., Bustos, A.-S., Ortiz-Sempértegui, J., Linares-Pastén, J. A., & Peñarrieta, J. M. (2023). Molecular characterization of a galactomannan extracted from Tara (Caesalpinia spinosa) seeds. *Scientific Reports,* 13, 21893. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49149-3

Ibieta, G., Bustos, A.-S., Ortiz-Sempértegui, J., Linares-Pastén, J. A., & Peñarrieta, J. M. (2023). Molecular characterization of a galactomannan

extracted from Tara (Caesalpinia spinosa) seeds. *Scientific Reports*, 13, 21893. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49149-3

Instituto Nacional de Biodiversidad del Ecuador (INABIO). (s. f.). Registros botánicos de Cynophalla didymobotrys en Ecuador. *Base de datos institucional.* Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://bndb.sisbioecuador.bio/bndb/species/347854

Instituto Nacional de Biodiversidad del Ecuador (INABIO). (s. f.). Registros botánicos de Cynophalla didymobotrys en Ecuador. *Base de datos institucional.* Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://bndb.sisbioecuador.bio/bndb/collections/list.php?taxa=5227&usethes=1

International Union for Conservation of Nature. (2020). IUCN *Global Standard for Nature-based Solutions:* A user-friendly framework for the verification, design and scaling-up of NbS (1.ª ed.). IUCN. https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2020.08.en

Jácome-Aguirre, G., Farinango-Guatemal, D., León-Espinoza, M., & Rosales-Enríquez, O. (2024). Efectos del cambio de cobertura vegetal en la distribución potencial de la Mosquera (Croton wagneri Müll. arg.) en la cuenca hidrográfica del río Mira, Ecuador. *Investigaciones Geográficas,* (82), 127–144. https://doi.org/10.14198/INGEO.27083

Jaramillo-Colorado, B. E., Suarez-López, S., & Marrugo-Santander, V. (2019). Volatile chemical composition of essential oil from Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch and their fumigant and repellent activities. *Acta Scientiarum. Biological Sciences,* 41, e46822. https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v41i1.46822

Jaramillo-Colorado, B. E., Suarez-López, S., & Marrugo-Santander, V. (2019). Volatile chemical composition of essential oil from Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch and their fumigant and repellent activities. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 41, e46822. https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v41i1.46822

Johnstone, J. F., Allen, C. D., Franklin, J. F., Frelich, L. E., Harvey, B. J., Higuera, P. E., Mack, M. C., Meentemeyer, R. K., Metz, M. R., Perry, G. L. W., Schoennagel, T., y Turner, M. G. (2016). Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment,* 14(7), 369–378. https://doi.org/10.1002/fee.1311

Joshi, C., Mathur, P., & Khare, S. K. (2011). Degradation of phorbol esters by Pseudomonas aeruginosa PseA during solid-state fermentation of deoiled Jatropha curcas seed cake. *Bioresource Technology,* 102(7), 4815–4819. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.039

Joshi, C., Mathur, P., & Khare, S. K. (2011). Degradation of phorbol esters by Pseudomonas aeruginosa PseA during solid-state fermentation of deoiled Jatropha curcas seed cake. *Bioresource Technology*, 102(7), 4815–4819. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.039

Kennedy, C., Cuddihy, J., y Engel-Yan, J. (2007). The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 43–59. https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107

Laliberté, E., & Legendre, P. (2010). A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1), 299–305. https://doi.org/10.1890/08-2244.1

Lam, E. J., Cánovas, M., Gálvez, M. E., Montofré, I. L., Keith, B. F., & Faz, A. (2017). Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 210–217. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.015

Leblanc, H. A., Nygren, P., & McGraw, R. L. (2006). Green mulch decomposition and nitrogen release from leaves of two Inga spp. in an organic alley-cropping practice in the humid tropics. *Soil Biology and Biochemistry,* 38(2), 349–358. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.05.012

Leython, S. (2010). Estudio morfológico de semillas del género Calliandra Benth. *Acta Botánica Venezuelica,* 33(1). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0084-59062010000100004

Leython, S. (2010). Estudio morfológico de semillas del género Calliandra Benth. *Acta Botánica Venezuelica*, 33(1). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0084-59062010000100004

López Arévalo, G. T., & Morquecho Salto, J. C. (2025). Minka e identidad colectiva: Contraste con los clusters de la teoría occidental y sus limitaciones. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(1), 3204–3215. https://doi.org/10.56712/latam.v6i1.3567

Lozsan, A., Rivas, I., Rodríguez, G., Martínez, S., & Pérez, M. A. (2017). Determination of surface-active characteristics of a natural surfactant extracted from Sapindus saponaria*. Tenside Surfactants Detergents*, 54(2), 109–117. https://doi.org/10.3139/113.110491

Luhas, J., Mikkilä, M., Kylkilahti, E., Miettinen, J., Malkamäki, A., Pätäri, S., Korhonen, J., Pekkanen, T. L., Tuppura, A., Lähtinen, K., Autio, M., Linnanen, L., Ollikainen, M., & Toppinen, A. (2021). Pathways to a forest-based bioeconomy in 2060 within policy targets on climate change mitigation and biodiversity protection. *Forest Policy and Economics*, 131, Artículo 102551. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102551

Macía, M. J., & Barfod, A. S. (2000). Economic botany of Spondias purpurea (Anacardiaceae) in Ecuador. *Economic Botany*, 54(4), 449–458. https://doi.org/10.1007/BF02866544

Macía, M. J., & Barfod, A. S. (2000). Economic botany of Spondias purpurea (Anacardiaceae) in Ecuador. *Economic Botany,* 54(4), 449–458. https://doi.org/10.1007/BF02866544

Magneville, C., Loiseau, N., Albouy, C., Casajus, N., Claverie, T., Escalas, A., Leprieur, F., Maire, E., Mouillot, D., & Villéger, S. (2022). mFD: An R package to compute and illustrate the multiple facets of functional diversity. Ecography, 2022(1), *Artículo e05904*. https://doi.org/10.1111/ecog.05904

Maldonado-Arciniegas, F., Ruales, C., Caviedes, M., Ramírez, D., & León-Reyes, A. (2018). An evaluation of physical and chemical scarification

methods on seed germination of Vachellia macracantha. *Acta Agronomica,* 67(1), 120–125. https://doi.org/10.15446/acag.v67n1.60696

Maldonado-Arciniegas, F., Ruales, C., Caviedes, M., Ramírez, D., & León-Reyes, A. (2018). An evaluation of physical and chemical scarification methods on seed germination of Vachellia macracantha. *Acta Agronomica,* 67(1), 120–125. https://doi.org/10.15446/acag.v67n1.60696

Marín-Velásquez, T. D., & Arriojas-Tocuyo, D. D. J. (2021). Efecto remediador de extractos de Sapindus saponaria sobre un suelo contaminado con gasoil a nivel de laboratorio. *Ciencia & Desarrollo*, 20(1), 13–26. https://doi.org/10.33326/26176033.2021.1.1105

Marín-Velásquez, T. D., & Arriojas-Tocuyo, D. D. J. (2021). Efecto remediador de extractos de Sapindus saponaria sobre un suelo contaminado con gasoil a nivel de laboratorio. *Ciencia & Desarrollo*, 20(1), 13–26. https://doi.org/10.33326/26176033.2021.1.1105

Martin, A., Dawson, N., Rodríguez, I., Bose, R., & Cotton, I. (2026). Towards just and transformative social–ecological restoration. *Nature Sustainability,* 9(3), 353–359. https://doi.org/10.1038/s41893-025-01702-w

Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1980). *Autopoiesis and cognition: The realization of the living.* D. Reidel Publishing Company. https://doi.org/10.1007/978-94-009-8947-4

McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yepez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x

McGarigal, K., & Marks, B. J. (1995). FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure (Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351). *USDA Forest Service,* Pacific Northwest Research Station. https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351

Meadows, D. H. (2008). *Thinking in systems: A primer.* Chelsea Green Publishing.

Mercado Gómez, J. D., Prieto-Torres, D. A., & Rojas-Soto, O. (2020). Climatic affinities of Neotropical species of Capparaceae*. Botanical Journal of the Linnean Society*, 193(2), 263–275. https://doi.org/10.1093/botlinnean/boz092

Mercado Gómez, J. D., Prieto-Torres, D. A., & Rojas-Soto, O. (2020). Climatic affinities of Neotropical species of Capparaceae. Botanical Journal of the *Linnean Society*, 193(2), 263–275. https://doi.org/10.1093/botlinnean/boz092

Mohammed, M., Bridgemohan, P., Graham, O., Wickham, L., Bridgemohan, R. S. H., & Mohammed, Z. (2019). Postharvest Physiology, Biochemistry and Quality Management of Chili Plum (Spondias purpurea var. Lutea): A Review. *Journal of Food Research*, 8(3), 1–15. https://doi.org/10.5539/jfr.v8n3p1

Mohammed, M., Bridgemohan, P., Graham, O., Wickham, L., Bridgemohan, R. S. H., & Mohammed, Z. (2019). Postharvest Physiology, Biochemistry and Quality Management of Chili Plum (Spondias purpurea var. Lutea): A Review. *Journal of Food Research*, 8(3), 1–15. https://doi.org/10.5539/jfr.v8n3p1

Murga-Orrillo, H., Lobo, F. de A., Amorim, R. S. S., Dionisio, L. F. S., Nuñez Bustamante, E., Chu-Koo, F. W., Arévalo López, L. A., Arévalo-Hernández, C. O., & Abanto-Rodriguez, C. (2023). Increased Production of Tara (Caesalpinia spinosa) by Edaphoclimatic Variation in the Altitudinal *Gradient of the Peruvian Andes. Agronomy,* 13(3), 646. https://doi.org/10.3390/agronomy13030646

Murga-Orrillo, H., Lobo, F. de A., Amorim, R. S. S., Dionisio, L. F. S., Nuñez Bustamante, E., Chu-Koo, F. W., Arévalo López, L. A., Arévalo-Hernández, C. O., & Abanto-Rodriguez, C. (2023). Increased Production of Tara (Caesalpinia spinosa) by Edaphoclimatic Variation in the Altitudinal *Gradient of the Peruvian Andes. Agronomy*, 13(3), 646. https://doi.org/10.3390/agronomy13030646

Nieto, C., & Barona, N. (2007). El guarango: Una opción agroindustrial y de exportación para conservación productiva. *Fundación Desde El Surco.*

Nowak, D. J., y Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution,* 116(3), 381–389. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7

Olvera-Licona, G., Machuca, R., Borja, A., Corona, A., Zaragoza, I., Arreola, J. G., & Jiménez, J. (2021). Xilotecnia de la madera de Schinus molle L. de una plantación forestal comercial en Hidalgo*, México. Madera y Bosques*, 27(1), e2711567. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2711567

Olvera-Licona, G., Machuca, R., Borja, A., Corona, A., Zaragoza, I., Arreola, J. G., & Jiménez, J. (2021). *Xilotecnia de la madera de Schinus molle L*. de una plantación forestal comercial en Hidalgo, México. *Madera y Bosques,* 27(1), e2711567. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2711567

Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C., & Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: *The nexus. Journal of Bioresources and Bioproducts,* 6(2), 83–107. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.004

Osborne, T., Brock, S., Chazdon, R., Chomba, S., Garen, E., Gutierrez, V., Lave, R., Lefevre, M., & Sundberg, J. (2021). The political ecology playbook for ecosystem restoration: Principles for effective, equitable, and transformative landscapes. *Global Environmental Change*, 70, Article 102320. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102320

Ostrom, E. (1990). Governing the commons: The evolution of institutions for collective action. *Cambridge University Press.*

Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 325(5939), 419–422. https://doi.org/10.1126/science.1172133

Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems*. Science,* 325(5939), 419–422. https://doi.org/10.1126/science.1172133

Ostrom, E. (2010). Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. *Global Environmental Change*, 20(4), 550–557. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.004

Paiva, M. J. M., Araujo, M. S., Carvalho, N. L., Paiva, R. F. D., Herrera, S. D. S. C., Vellano, P. O., D'Alessandro, W. B., Santos, T. T., & Souza, G. S. (2026). Application of Sapindus saponaria L. extract as a natural biosurfactant in liquid soap formulation. *Brazilian Journal of Biology*, 86, e300385. https://doi.org/10.1590/1519-6984.300385

Paiva, M. J. M., Araujo, M. S., Carvalho, N. L., Paiva, R. F. D., Herrera, S. D. S. C., Vellano, P. O., D'Alessandro, W. B., Santos, T. T., & Souza, G. S. (2026). Application of Sapindus saponaria L. extract as a natural biosurfactant in liquid soap formulation. *Brazilian Journal of Biology*, 86, e300385. https://doi.org/10.1590/1519-6984.300385

Pennington, T. D. (1997). The genus Inga: Botany. Royal Botanic Gardens*, Kew.* https://shop.kew.org/the-genus-inga-botany

Pennington, T. D. (1997). The genus Inga: Botany. *Royal Botanic Gardens*, Kew. https://shop.kew.org/the-genus-inga-botany

Pennington, T. D. (1997). The genus Inga: Botany. Royal Botanic Gardens, *Kew.* https://shop.kew.org/the-genus-inga-botany

Peña, K., & Bräuning, A. (2026). Effect of Climate on Ring-Width and Vessel Variables of Vachellia macracantha from Dry Forest in Southern Ecuador. *Tree-Ring Research*, 82(2), 89–102. https://doi.org/10.3959/TRR2025-7

Peña, K., & Bräuning, A. (2026). Effect of Climate on Ring-Width and Vessel Variables of Vachellia macracantha from Dry Forest in Southern Ecuador. *Tree-Ring Research,* 82(2), 89–102. https://doi.org/10.3959/TRR2025-7

Pereira, M. P., Corrêa, F. F., Polo, M., de Castro, E. M., Cardoso, A. Á., & Pereira, F. J. (2016). Seed germination of Schinus molle L. (Anacardiaceae) as related to its anatomy and dormancy alleviation. *Seed Science Research*, 26(4), 351–361. https://doi.org/10.1017/S0960258516000167

Popper, K. R. (1959). The logic of scientific discovery. *Hutchinson & Co*. (Trabajo original publicado en 1935).

Portillo-Quintero, C. A., y Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the *Americas. Biological Conservation,* 143(1), 144–155. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.020

Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERACIÓN. (2009). La tara (Caesalpinia spinosa) en Perú, Bolivia y Ecuador: *Análisis de la cadena productiva en la región* (Serie Investigación y Sistematización, Vol. 2). ECOBONA-INTERCOOPERACIÓN.

Quiroz Dahik, C., Crespo, P., Stimm, B., Mosandl, R., Cueva, J., Hildebrandt, P., & Weber, M. (2021). Impacts of pine plantations on carbon stocks of páramo sites in southern Ecuador. *Carbon Balance and Management*, 16, Article 5. https://doi.org/10.1186/s13021-021-00168-5

Raworth, K. (2012). A safe and just space for humanity: Can we live within the doughnut? Oxfam Discussion Paper*. Oxfam GB.*

Raworth, K. (2017). Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st-century economist. *Chelsea Green Publishing*.

Reed, B. (2007). Shifting from 'sustainability' to regeneration. Building Research & Information, 35(6), 674–680. https://doi.org/10.1080/09613210701475753

Robinson, J. M., Gellie, N., MacCarthy, D., Mills, J. G., O'Donnell, K., & Redvers, N. (2021). Traditional ecological knowledge in restoration ecology: A call to listen deeply, to engage with, and respect Indigenous voices. *Restoration Ecology*, 29(4), Article e13381. https://doi.org/10.1111/rec.13381

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). Calliandra pittieri Standl. Plants of the World Online. *Recuperado el 2 de septiembre de 2026*, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:42259-2

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). Calliandra pittieri Standl. *Plants of the World Online.* Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:42259-2

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Inga feuilleei* DC. Plants of the World Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:128507-2

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Inga feuilleei DC.* Plants of the World Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:128507-2

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). Inga insignis Kunth. *Plants of the World* Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:128550-2

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Inga insignis Kunth*. Plants of the World Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:128550-2

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). *Tara spinosa (Molina) Britton & Rose*. Plants of the World Online. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/249443-2

Royal Botanic Gardens, Kew. (s. f.). Tara spinosa (Molina) Britton & Rose. *Plants of the World Online*. Recuperado el 2 de septiembre de 2026, de https://powo.science.kew.org/taxon/249443-2

Sangay, S., Sanguin, H., Tournier, E., Thioulouse, J., Prin, Y., & Duponnois, R. (2017). Impacto de la simbiosis micorrítica arbuscular en el crecimiento temprano del cultivo de tara [Caesalpinia spinosa (Molina) Kuntze]. *Revista Forestal del Perú*, 32(2), 89–96. https://doi.org/10.21704/rfp.v32i2.1040

Sangay, S., Sanguin, H., Tournier, E., Thioulouse, J., Prin, Y., & Duponnois, R. (2017). Impacto de la simbiosis micorrítica arbuscular en el crecimiento temprano del cultivo de tara [Caesalpinia spinosa (Molina) Kuntze]. *Revista Forestal del Perú*, 32(2), 89–96. https://doi.org/10.21704/rfp.v32i2.1040

Scalvenzi, L., Durofil, A., Cáceres Claros, C., Pérez Martínez, A., Guardado Yordi, E., Manfredini, S., Baldini, E., Vertuani, S., & Radice, M. (2024). Unleashing Nature's Pesticide: A Systematic Review of Schinus molle Essential Oil's Biopesticidal Potential. *Sustainability,* 16(23), 10444. https://doi.org/10.3390/su162310444

Scalvenzi, L., Durofil, A., Cáceres Claros, C., Pérez Martínez, A., Guardado Yordi, E., Manfredini, S., Baldini, E., Vertuani, S., & Radice, M. (2024). Unleashing Nature's Pesticide: A Systematic Review of Schinus molle Essential Oil's Biopesticidal Potential. *Sustainability,* 16(23), 10444. https://doi.org/10.3390/su162310444

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E. H., Rietkerk, M., y Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature,* 461, 53–59. https://doi.org/10.1038/nature08227

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E. H., Rietkerk, M., & Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260), 53–59. https://doi.org/10.1038/nature08227

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E. H., Rietkerk, M., & Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260), 53–59. https://doi.org/10.1038/nature08227

Singh, S., Miller, C. T., Singh, P., Sharma, R., Rana, N., Dhakad, A. K., & Dubey, R. K. (2024). A comprehensive review on ecology, life cycle and use of *Tecoma stans (Bignoneaceae). Botanical Studies*, 65, 6. https://doi.org/10.1186/s40529-024-00412-4

Singh, S., Miller, C. T., Singh, P., Sharma, R., Rana, N., Dhakad, A. K., & Dubey, R. K. (2024). A comprehensive review on ecology, life cycle and use of Tecoma stans (Bignoneaceae). *Botanical Studies,* 65, 6. https://doi.org/10.1186/s40529-024-00412-4

Soja, E. W. (2010). Seeking spatial justice. *University of Minnesota Press*. https://doi.org/10.5749/minnesota/9780816666676.001.0001

Solarte-Toro, J. C., & Cardona Alzate, C. A. (2023). Sustainability of biorefineries: Challenges and perspectives. *Energies,* 16(9), 3786. https://doi.org/10.3390/en16093786

Solarte-Toro, J. C., Ortiz-Sanchez, M., & Cardona Alzate, C. A. (2023). Sustainability analysis of biorefineries based on country socio-economic and environmental context: A step-by-step way for the integral analysis of biomass upgrading processes. *Renewable Energy,* 206, 1147–1157. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.065

Tsuzuki, J. K., Svidzinski, T. I. E., Shinobu, C. S., Silva, L. F. A., Rodrigues-Filho, E., Cortez, D. A. G., & Ferreira, I. C. P. (2007). Antifungal activity of the extracts and saponins from Sapindus saponaria L. *Anais da Academia Brasileira de Ciências,* 79(4), 577–583. https://doi.org/10.1590/S0001-37652007000400002

Tsuzuki, J. K., Svidzinski, T. I. E., Shinobu, C. S., Silva, L. F. A., Rodrigues-Filho, E., Cortez, D. A. G., & Ferreira, I. C. P. (2007). Antifungal activity of the extracts and saponins from Sapindus saponaria L. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79(4), 577–583. https://doi.org/10.1590/S0001-37652007000400002

UNESCO, Centro del Patrimonio Mundial. (1972/2023). Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, *Cultural y Natural y Directrices* Prácticas para su aplicación (categoría de paisajes culturales incorporada en 1992, párr. 39). https://whc.unesco.org/en/culturallandscape/

UNESCO. (2019). Imbabura UNESCO Global Geopark. *International Geoscience and Geoparks Programme*. https://www.unesco.org/en/iggp/imbabura-unesco-global-geopark

UNESCO. (2019). Imbabura UNESCO Global Geopark. International *Geoscience and Geoparks Programme.* https://www.unesco.org/en/iggp/imbabura-unesco-global-geopark

UNESCO. (2019). *Imbabura UNESCO Global Geopark*. Programa Internacional de Geociencias y Geoparques (IGGP). https://www.unesco.org/en/iggp/imbabura-unesco-global-geopark

Vargas-Figueroa, J. A., & Torres-González, A. M. (2018). Germination and seed conservation of a pioneer species, Tecoma stans (Bignoniaceae), from tropical dry forest of Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 918–936. https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33423

Vargas-Figueroa, J. A., & Torres-González, A. M. (2018). Germination and seed conservation of a pioneer species, Tecoma stans (Bignoniaceae), from tropical dry forest of Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 918–936. https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33423

Vásquez Bedón, E. M. (2022). *Islas de calor urbano* (ICU) y morfología urbana en el centro histórico de Ibarra [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio Institucional PUCE. https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/13584

Vilema-Ramos, B., León-Espinoza, M., Layana-Bajaña, E., & Rosales-Enríquez, O. (2023). Cambios en la cobertura del matorral seco montano del Valle Chota (Imbabura y Carchi, Ecuador) entre 1990 y 2020*. Revista Peruana de Biología*, 30(4), e24672. https://doi.org/10.15381/rpb.v30i4.24672

Villamar Flores, L. A. (2015). Estandarización de las etapas de micropropagación in vitro de la guaba (Inga insignis) endémica de la provincia de Imbabura. *Repositorio Ecuatoriano de Investigación* (REDI/CEDIA). https://redi.cedia.edu.ec/document/58850

Villamar Flores, L. A. (s. f.). Estandarización de las etapas de micropropagación in vitro de la guaba (Inga insignis) endémica de la provincia de Imbabura. *Repositorio Ecuatoriano de Investigación* (REDI/CEDIA). https://redi.cedia.edu.ec/document/58850

Villena Velásquez, J. J., & Seminario, J. F. (2021). Origen y domesticación de Tara spinosa (Leguminosae, Caesalpinioideae). *Lilloa,* 58(2), 131–159. https://doi.org/10.30550/j.lil/2021.58.2/2021.11.14

von Bertalanffy, L. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications.* George Braziller.

von Foerster, H. (1979). Cybernetics of cybernetics. En K. Krippendorff (Ed.), *Communication and control in society* (pp. 5–8). Gordon and Breach.

Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2), 5. https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205

West, P., Igoe, J., & Brockington, D. (2006). Parks and peoples: The social impact of protected areas. *Annual Review of Anthropology,* 35, 251–277. https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.35.081705.123308

Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine.* MIT Press / John Wiley & Sons

Wunder, S., & Albán, M. (2008). Decentralized payments for environmental services: The cases of Pimampiro and PROFAFOR in Ecuador. *Ecological Economics,* 65(4), 685–698. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.11.004

Resumen

Hacia una Biocibernética Regenerativa propone un enfoque integral para la restauración de territorios vivos, especialmente en el contexto del Geoparque Imbabura. El libro plantea superar la sostenibilidad basada únicamente en “reducir el daño” y avanzar hacia un desarrollo regenerativo que aumente la capacidad de vida, resiliencia y autoorganización de los sistemas socioecológicos. La obra integra biosfera, sociosfera y tecnosfera, relacionando ecología, sociedad, tecnología, gobernanza, bioeconomía y restauración forestal. También aborda la biocibernética, la resiliencia, los ciclos adaptativos, el monitoreo mediante tecnologías y la aplicación de estos principios a especies forestales y proyectos biobasados.

Palabras Clave: Biocibernética regenerativa; sistemas socioecológicos; desarrollo regenerativo; restauración ecológica; resiliencia territorial.

Abstract

Toward a Regenerative Biocybernetics proposes a comprehensive approach to the restoration of living territories, particularly in the context of the Imbabura Geopark. The book argues for moving beyond sustainability based solely on “reducing harm” and advancing toward regenerative development that enhances the life capacity, resilience, and self-organization of socio-ecological systems. The work integrates the biosphere, sociosphere, and technosphere, linking ecology, society, technology, governance, the bioeconomy, and forest restoration. It also addresses biocybernetics, resilience, adaptive cycles, technology-based monitoring, and the application of these principles to forest species and bio-based projects.

Keywords: Regenerative biocybernetics; socio-ecological systems; regenerative development; ecological restoration; territorial resilience.



UTN
IBARRA - ECUADOR



Esta obra presenta una propuesta integral para el fortalecimiento de la biocibernética desde una perspectiva socioecológica, como herramienta clave para el desarrollo regenerativo y la restauración de territorios vivos. A lo largo de sus páginas, se exploran las bases teóricas y prácticas, que vinculan la tecnología, la naturaleza y la comunidad, promoviendo un equilibrio entre el progreso y la sostenibilidad.



Dirigido a estudiantes, investigadores, profesionales y a todas las personas comprometidas con el cuidado del ambiente y el bienestar de las futuras generaciones, este libro invita a repensar la relación entre sociedad y naturaleza desde una visión regenerativa, inclusiva y de largo plazo.



Contamos con la valiosa colaboración de
COLEGIO DE INGENIEROS FORESTALES DE IMBABURA (CIFI) y el
COLEGIO NACIONAL DE INGENIEROS FORESTALES DEL ECUADOR (CONIFOR),
instituciones que respaldan este trabajo
en favor de la sostenibilidad y el manejo responsable
de nuestros recursos naturales.



CONOCIMIENTO QUE IMPULSA
UN FUTURO SOSTENIBLE

NATURALEZA | CIENCIA | INNOVACIÓN | COMUNIDAD



"Restaurar los territorios es construir vida, hoy y siempre."

COLEGIO DE INGENIEROS FORESTALES DE IMBABURA
CIFI

CONIFOR
COLEGIO NACIONAL DE INGENIEROS FORESTALES

OM EDITORIAL