



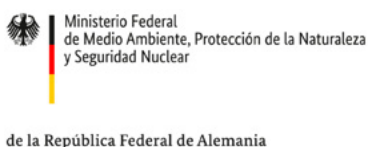
Atendiendo compromisos globales y necesidades hídricas locales

Priorización de áreas de restauración en Costa Rica con la Herramienta de Optimización de Oportunidades de Restauración

Leander Raes, Kelly Meza Prado, Melinka Nájera, Peter Hawthorne, Javier León Saborío, Óscar Chacón, Adrian Vogl, Andrés Sanchún †



UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA



Acerca de la UICN

La UICN es una Unión de Miembros compuesta por Estados soberanos, agencias gubernamentales y organizaciones de la sociedad civil. La UICN pone a disposición de las entidades públicas, privadas y no gubernamentales, los conocimientos y las herramientas que posibilitan, de manera integral, el progreso humano, el desarrollo económico y la conservación de la naturaleza.

Creada en 1948, la UICN se ha convertido en la red ambiental más grande y diversa del mundo. La UICN cuenta con la experiencia, los recursos y el alcance de sus más de 1500 organizaciones Miembro y los aportes de más de 18 000 expertos. La UICN es uno de los principales proveedores de datos, evaluaciones y análisis sobre conservación. Su extensa y diversa membresía hacen de la UICN una incubadora y un repositorio confiable de las mejores prácticas y herramientas de conservación, así como de las directrices y estándares internacionales.

La UICN proporciona un espacio neutral en el que actores diversos, incluyendo gobiernos, ONG, científicos, empresas, comunidades locales, grupos indígenas, organizaciones religiosas y otros pueden trabajar juntos para crear e implementar soluciones a los retos ambientales y lograr un desarrollo sostenible.

La UICN trabaja con diversos socios y simpatizantes para llevar a la práctica un amplio y diverso portafolio de proyectos de conservación en todo el mundo. Estos proyectos, que combinan los últimos avances científicos con los conocimientos tradicionales de las comunidades locales, procuran detener y revertir la pérdida de hábitats, restaurar los ecosistemas y mejorar el bienestar humano.

<http://www.uicn.org/es>

<https://twitter.com/IUCN/>

Atendiendo compromisos globales y necesidades hídricas locales

Priorización de áreas de restauración en Costa Rica con la Herramienta de Optimización de Oportunidades de Restauración

Leander Raes, Kelly Meza Prado, Melinka Nájera, Peter Hawthorne, Javier León Saborío, Óscar Chacón, Adrian Vogl, Andrés Sanchún †

La presentación del material en esta publicación y las denominaciones empleadas para las entidades geográficas no implican en absoluto la expresión de una opinión por parte de la UICN o de otra organización participante sobre la situación jurídica de un país, territorio o zona, o de sus autoridades, o acerca de la demarcación de sus límites o fronteras.

Los puntos de vista que se expresan en esa publicación no reflejan necesariamente los de la UICN o de otra organización participante.

La UICN se complace en agradecer el apoyo de sus socios marco por su financiación del programa de la UICN: el Ministerio de Asuntos Exteriores de Dinamarca; el Ministerio de Asuntos Exteriores de Finlandia; el Gobierno de Francia y la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD); el Ministerio del Medio Ambiente de la República de Corea; la Agencia Noruega para la Cooperación al Desarrollo (Norad); el Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (Asdi); la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) y el Departamento de Estado de Estados Unidos.

Esta publicación ha sido posible gracias a la generosidad de USAID, UKAID y IKI-BMU; a través de los proyectos:

- “Programa Regional de Cambio Climático (PRCC)”, financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).
- “Mejorar la manera en que el conocimiento sobre los bosques es entendido y utilizado a nivel internacional” (KNOWFOR2), financiado por UK AID, Departamento de Desarrollo Internacional (DFID).
- “Barómetro del Desafío de Bonn”, financiado por la Iniciativa Internacional para el Clima (IKI) del Ministerio Federal del Medio Ambiente de Alemania (BMU).

Publicado por:	UICN, Gland, Suiza.
Producido por:	UICN, Oficina Regional para México, América Central y el Caribe (ORMACC).
Derechos reservados:	© 2022 UICN, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales. Se autoriza la reproducción de esta publicación con fines educativos y otros fines no comerciales sin permiso escrito previo de parte de quien detenta los derechos de autor con tal de que se mencione la fuente. Se prohíbe reproducir esta publicación para la venta o para otros fines comerciales sin permiso escrito previo de quien detenta los derechos de autor.
Citación recomendada:	Raes, L., Meza Prado, K., Nájera, M., Hawthorne, P., León Saborío, J., Chacón, Ó., Vogl, A., Sanchún, A. (2022). <i>Atendiendo a compromisos globales y necesidades hídricas locales: Priorización de áreas de restauración en Costa Rica con la herramienta de optimización de oportunidades de restauración</i> . Gland, Suiza: UICN .
ISBN:	978-2-8317-2196-5 (PDF)
DOI:	https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2022.04.es
Edición, diseño y diagramación:	Marta Lucía Gómez Zuluaga
Fotografías de la portada:	Leander Raes (finca ganadera con sistema silvopastoril en las faldas del volcán Barva y vivero para restauración forestal en el Parque Nacional El Cangrejo), Tony Nello (bosque ribereño en la península de Nicoya), Manuel Guerrero (mosaico de cultivos de caña de azúcar, café, pasturas y bosque en áreas de protección de fuentes de agua, en el cantón de Grecia, Costa Rica).

Contenido

Índices de cuadros, figuras y mapas.....	v
Presentación	xi
Agradecimientos	xii
Siglas.....	xiii
1 Introducción	1
2 Programas y acciones de restauración de Costa Rica.....	5
3 Análisis del impacto en la provisión de servicios ecosistémicos	9
3.1 Exportación de sedimentos (modelo SDR)	9
3.2 Exportación de nutrientes (modelo NDR)	10
3.3 Mapas de impacto potencial	11
4 Beneficiarios	13
4.1 Producción hidroeléctrica.....	13
4.2 Agua potable.....	13
4.3 Humedales.....	14
4.4 Corredores biológicos.....	16
4.5 Priorización con base en los beneficiarios	16
5 Priorización con la Herramienta de Optimización de Restauración Oportuna (ROOT).....	17
5.1 Optimización con ROOT	17
5.2 Datos requeridos por ROOT	17
5.3 El proceso de optimización	17
5.4 Resultados de la optimización	19
6 Las acciones de restauración y su priorización espacial con ROOT	21
6.1 NAMA Ganadería en pastos	21

6.1.1 Sistema silvopastoril en pastos ubicados a más de 1000 m.s.n.m. dentro de la NAMA Ganadería.....	21
6.1.2 Sistema silvopastoril en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud agrícola dentro de la NAMA Ganadería	27
6.1.3 Regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal dentro de la NAMA Ganadería	31
6.2 PPSA para pastos fuera del área de implementación de la NAMA Ganadería.....	36
6.3 NAMA Café	40
6.4 Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) para los cultivos de piña, banano y palma de aceite	45
6.4.1 Buenas Prácticas Agrícolas para el cultivo de piña	45
6.4.2 Buenas Prácticas Agrícolas para el cultivo del banano	49
6.4.3 Buenas Prácticas Agrícolas para el cultivo de la palma de aceite	53
6.4.4 Restauración de los bosques ribereños como buenas prácticas agrícola en los cultivos de piña, banano y palma de aceite	57
6.5 Priorización de todas las acciones de restauración.....	62
7 Conclusiones y recomendaciones.....	63
Bibliografía	65
Anexos	71

Índices de cuadros, figuras y mapas

Cuadros

1	Acciones de restauración consideradas para la evaluación ROAM en Costa Rica. ...	6
2	Metas propuestas en ha para lograr el compromiso de Costa Rica con el Desafío de Bonn	7
3	Datos para programar y correr ROOT usados para identificar áreas prioritarias por acción.....	18

Índice de cuadros en Anexo

A1	Variables biofísicas de los usos actuales del suelo para los modelos NDR y SDR.....	72
A2	Indicadores de café de sol y sombra	76
A3	Regiones considerados para café y porcentajes de café de sol y de sombra	77
A4	Variables biofísicos de InVEST, restauró los usos de la tierra para los modelos NDR y SDR.....	77
A5	Indicadores de pasturas y plantación forestal y peso en promedio ponderado (pastura y plantación).....	79
A6	Margen de error de optimización ROOT	81

Figuras

1	Mapa de cálculo de impacto potencial.	12
2	Simbología utilizada en los mapas de optimización de resultados de ROOT para las áreas meta de implementación.	20
3	Simbología de clasificación de priorización de resultados ROOT con más clasificaciones.	20

Índice de mapas

1.1	Uso del suelo-cobertura.....	10
1.2	Subcuencas	10
1.3	Elevación digital	10
1.4	Precipitación promedio anual.....	10
1.5	Índice de erosión pluvial (R).....	10
1.6	Factor de erodabilidad (K)	10
1	“Áreas de servicio” que alimentan las fuentes de agua usadas en la producción de hidroelectricidad	14
2	Población sin acceso a agua potable. Del color oscuro al claro se representan los distritos con más personas sin acceso a agua potable.....	15
3	Las áreas azules representan las áreas que abastecen los puntos de extracción de agua potable.	15
4	Localización de humedales de Costa Rica.	15
5	Localización de los 47 corredores biológicos de Costa Rica.	16
6	Unidades de decisión espacial, hexágonos de 400 ha.	18
7	Mapa de consenso. De color oscuro a color claro, las UDE escogidas con frecuencia alta, intermedia y baja.....	19
8	Ubicación de pastos para ganado lechero dentro de la NAMA Ganadería.	22
9	Impacto en la exportación de sedimentos del sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero (NAMA Ganadería).....	23
10	Impacto en la exportación de nitrógeno del sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero (NAMA Ganadería).....	23
11	Impacto en la exportación de fósforo del sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero (NAMA Ganadería).....	24
12	Optimización de ROOT para el área meta de implementación de un sistema silvopastoril en pastos de ganado lechero ubicadas en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2....	24
13	Optimización de ROOT para el área meta de implementación de sistemas silvopastoriles en pastos de ganado lechero, en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Figura 2 ...	25
14	Optimización de ROOT para el área meta de implementación de sistemas silvopastoriles en pastos de ganado lechero, en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., con mapas de impacto potencial de beneficiarios y de corredores biológicos. Figura 2.....	25
15	Áreas de priorización para la implementación de un sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m. Simbología según Figura 3	26
16	Ubicación de pastos para ganado de carne con aptitud agrícola, dentro del NAMA Ganadería.....	27
17	Impacto de la exportación de sedimentos de los sistemas silvopastoriles en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud agrícola (NAMA Ganadería)	28

18	Impacto en la exportación de nitrógeno de los sistemas silvopastoriles en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud agrícola (NAMA Ganadería)	28
19	Impacto en la exportación de fósforo de los sistemas silvopastoriles en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud agrícola (NAMA Ganadería)	29
20	Optimización de ROOT en el área meta para la implementación de un sistema silvopastoril y mejoramiento de pastos en pastizales con aptitud agrícola, a menos de 1000 m.s.n.m., utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.....	29
21	Optimización de ROOT en el área meta para la implementación de un sistema silvopastoril y mejoramiento de pastos en pastizales con aptitud agrícola, a una altura menor a 1000 m.s.n.m., utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2	30
22	Optimización de ROOT en el área meta para la implementación de un sistema silvopastoril y mejoramiento de pastos en pastizales con aptitud agrícola, a menos de 1000 m.s.n.m., utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2	30
23	Áreas de priorización para la implementación de un sistema silvopastoril y mejoramiento de pastos en pastizales con aptitud agrícola, a menos de 1000 m.s.n.m. Simbología según Figura 3.	31
24	Ubicación de pastos para ganado de carne con aptitud forestal dentro de la NAMA Ganadería.....	32
25	Impacto en la exportación de sedimentos en zonas de regeneración natural de pastos con aptitud forestal a menos de 1000 m.s.n.m. (NAMA Ganadería).....	32
26	Impacto en la exportación de nitrógeno en zonas de regeneración natural en pastos con aptitud forestal a menos de 1000 m.s.n.m. (NAMA Ganadería)	33
27	Impacto en la exportación de fósforo en zonas de regeneración natural en pastos con aptitud forestal a menos de 1000 m.s.n.m. (NAMA Ganadería)	33
28	Optimización de ROOT en el área meta para la regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.....	34
29	Optimización ROOT área meta para la regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2	34
30	Optimización ROOT área meta para la regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2	35
31	Áreas de priorización para la regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal. Simbología según Figura 3.....	35
32	Ubicación de pastos ubicados fuera del área NAMA Ganadería	36
33	Impacto en la exportación de sedimentos en zonas de implementación de plantaciones forestales, en pastos fuera del área NAMA Ganadería	37
34	Impacto en la exportación de nitrógeno en zonas de implementación de plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería.....	37
35	Impacto en la exportación de fósforo en zonas de implementación de plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería.....	38
36	Optimización de ROOT en el área meta para plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2	38

37	Optimización de ROOT en el área meta para plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2	39
38	Optimización de ROOT área meta para plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2	39
39	Áreas de priorización para plantaciones forestales en pastos ubicados fuera del área de NAMA Ganadería. Simbología según Figura 3	40
40	Ubicación de áreas de cafetales donde aplican acciones de la NAMA Café	41
41	Impacto en la exportación de sedimentos en zonas donde aplican acciones de la NAMA Café.....	41
42	Impacto en la exportación de nitrógeno en zonas donde aplican acciones de la NAMA Café.....	42
43	Impacto en la exportación de fósforo en zonas donde aplican acciones de la NAMA Café	42
44	Optimización de ROOT en el área meta para la NAMA Café, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.	43
45	Optimización de ROOT en el área meta para la NAMA Café, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2	43
46	Optimización de ROOT en el área meta para la NAMA Café, con mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2 ..	44
47	Áreas de priorización para las acciones en zonas donde aplica la NAMA Café. Simbología según Figura 3	44
48	Ubicación de zonas de piña.	45
49	Impacto de las BPA en la exportación de sedimentos en las plantaciones de piña ...	46
50	Impacto de las BPA en la exportación de nitrógeno en las plantaciones de piña.....	46
51	Impacto de las BPA en la exportación de fósforo en las plantaciones de piña.....	47
52	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de piña, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.....	47
53	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de piña, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2	48
54	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de piña, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.4	48
55	Áreas de priorización para la implementación de las BPA en los cultivos de piña Simbología según Figura 3.4	49
56	Ubicación de las zonas de cultivo de banano.	50
57	Impacto de la implementación de las BPA en la exportación de nitrógeno de los cultivos de banano.....	50
58	Impacto de implementación de las BPA en la exportación de fósforo de los cultivos de banano	51

59	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de banano, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2	51
60	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de banano, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2	52
61	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de banano, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2	52
62	Áreas de priorización para la implementación de BPA en cultivos de banano. Simbología según Figura 3	53
63	Ubicación de zonas de cultivo de palma de aceite.	54
64	Impacto de la implementación de las BPA en la exportación de nitrógeno proveniente de los cultivos de palma de aceite.	54
65	Impacto de la implementación de las BPA en la exportación de fósforo proveniente de los cultivos de palma de aceite	55
66	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de palma de aceite, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2	55
67	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de palma de aceite, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2	56
68	Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de palma de aceite, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2	56
69	Áreas de priorización en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de palma de aceite. Simbología según Figura 3	57
70	Áreas potenciales para restaurar bosques ribereños en los cultivos de banano, piña y palma de aceite	58
71	Impacto de los bosques ribereños restaurados en la exportación de sedimentos provenientes de los cultivos de banano, piña y palma de aceite	58
72	Impacto de los bosques ribereños restaurados en la exportación de nitrógeno proveniente de los cultivos de banano, piña y palma de aceite.....	59
73	Impacto de los bosques ribereños restaurados en la exportación de fósforo proveniente de los cultivos de banano, piña y palma de aceite.	59
74	Optimización de ROOT en el área meta en zonas de potencial restauración de bosque ribereño, asociado a cultivos de banano, piña y palma de aceite, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2	60
75	Optimización de ROOT en el área meta en zonas de potencial restauración de bosque ribereño, asociado a cultivos de banano, piña y palma de aceite, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2	60
76	Optimización de ROOT en el área meta en zonas de potencial restauración de bosque ribereño, asociado a cultivo de banano, piña y palma de aceite, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.	61
77	Áreas de priorización para la restauración de bosque ribereño en zonas de cultivo de banano, piña y palma de aceite. Simbología según Figura 4	61

78	Optimización de todas las acciones de restauración según meta, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos	62
-----------	---	----

Índice de mapas en Anexo

A1	Localización de plantas para la producción hidroeléctrica en operación y en diversas etapas de planificación y construcción.	80
-----------	---	----

Presentación

Este informe presenta una metodología espacialmente explícita para identificar áreas prioritarias para la restauración funcional del paisaje a partir de la optimización de la prestación de servicios ecosistémicos. Este estudio profundiza también en el análisis realizado con la Metodología de Evaluación de Oportunidades de Restauración (ROAM) en Costa Rica, llevada a cabo por la Oficina Regional para México, América Central y el Caribe de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN ORMACC). La evaluación de la restauración se desarrolló con el apoyo y el compromiso de Costa Rica con el Desafío de Bonn para restaurar un millón de hectáreas de tierra.

El objetivo de esta publicación es mostrar cómo el uso de la Herramienta de Optimización de Oportunidades de Restauración (ROOT, por sus siglas en inglés) puede informar cuales áreas generarán el mayor impacto positivo con las acciones de restauración propuestas por el Comité Técnico de Restauración de Costa Rica. Esta priorización a escala nacional, se basa en el impacto potencial sobre la exportación de sedimentos y la retención de nutrientes.

El análisis muestra el impacto de las acciones propuestas sobre los servicios ecosistémicos y su demanda para aportar al diseño de proyectos, y dar a conocer programas o estrategias para la restauración de paisajes. Los análisis incluyen una serie de acciones pertenecientes a programas ya existentes en Costa Rica, propuestas por el Comité Técnico de la restauración organizado por el Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE). El proceso incluyó desde la aplicación de la herramienta InVEST, la generación de mapas de beneficiarios, hasta la aplicación de la herramienta ROOT.

El propósito de este estudio es priorizar áreas para cada acción de restauración por separado, y no busca hacer un análisis comparativo de las diferentes acciones de restauración¹.

¹ ROOT (*Restoration Opportunity Optimisation Tool*) es un instrumento para realizar análisis de optimización y *trade-off*. Utiliza información sobre el impacto potencial de las actividades de restauración o de cambios de manejo junto con la priorización espacial o mapas de cuencas de servicios, para identificar áreas clave para la provisión de servicios ecosistémicos. Disponible en: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/root>

Agradecimientos

La UICN expresa su agradecimiento a las siguientes personas que fueron clave para la elaboración de este documento gracias a su invaluable colaboración en la facilitación de información: Craig Beatty (WWF), Justin Johnson (Natural Capital Project), Gilbert Canet (MINAE), Carolina Álvarez, Ronald McCarthy (UICN), Bonnie Keeler (Natural Capital Project), Orli Handmaker (Natural Capital Project), German Obando. También hace un reconocimiento especial a Tony Nello y Tania Ammour de la Oficina Regional de la UICN para México, América Central y el Caribe.

Siglas

BPA	Buenas Prácticas Agrícolas
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
InVEST	Evaluación Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones (InVEST, por sus siglas en inglés)
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MINAE	Ministerio del Ambiente y Energía
NAMA	Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA, por sus siglas en inglés)
NDR	Proporción de exportación de nutrientes (NDR, por sus siglas en inglés)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ORMACC	Oficina Regional de la UICN para México, América Central y el Caribe
PPSA	Programa Nacional de Pagos por Servicios Ambientales
REDD	Reducción de las Emisiones de la Deforestación y la Degradación
RFPF	Restauración Funcional del Paisaje Forestal (FLR, por su siglas en inglés)
ROAM	Metodología para la Evaluación de las Oportunidades de Restauración (ROAM, por sus siglas en inglés)
ROOT	Herramienta de Optimización de Oportunidades de Restauración (ROOT, por sus siglas en inglés)
SDR	Proporción de exportación de sedimentos (SDR, por sus siglas en inglés)
UDE	Unidades de Decisión Espacial
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
USLE	Ecuación de Suelo Universal (USLE, por sus siglas en inglés)

1 Introducción

Restauración del paisaje forestal

Los servicios ecosistémicos se han definido como “los beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas” (MEA, 2005), o dicho de otra forma, “las condiciones y procesos de los ecosistemas que generan o ayudan a generar beneficios para las personas” (Guerry et al., 2015, p. 7349). Sin embargo, los términos “funciones”, “servicios” y “beneficios” del ecosistema se usan con frecuencia con diferentes significados (Fisher, Turner y Morling, 2009). A pesar de ello, es claro que las funciones o procesos de los ecosistemas solo generan servicios cuando hay seres humanos que se benefician (Fisher, Turner y Morling, 2009; Jax et al., 2013). Múltiples procesos dentro de un ecosistema dan una serie de servicios que pueden ser disfrutados por los seres humanos como beneficios tangibles (Ojea, Martín-Ortega y Chiabai, 2012). Por ejemplo, la cubierta forestal reduce la erosión del suelo al proteger la superficie del impacto de la lluvia. Una reducción de la erosión puede disminuir la cantidad de sedimentos que se escurren dentro de una cuenca, lo que a su vez puede mejorar la calidad del agua potable, generando un beneficio para su consumo (Brauman et al., 2007; Durán Zuazo y Rodríguez Pleguezuelo, 2008; Lele, 2009).

La degradación de la tierra y la pérdida de ecosistemas naturales modifican de manera significativa la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios ecosistémicos, lo que a su vez, repercute de forma negativa en el bienestar humano (Lawler et al., 2014; Balthazar et al., 2015). A pesar de que la conversión de los ecosistemas naturales, como por ejemplo, la transformación de los bosques a tierras agrícolas ha influido en la producción de alimentos, también es cierto que ha disminuido la provisión de muchos otros servicios ecosistémicos con los consecuentes impactos negativos (Lubowski, Plantinga y Stavins, 2006).

Uno de los retos fundamentales es satisfacer las necesidades humanas como la provisión de alimentos, madera, energía y otros bienes y servicios, pero también, es fundamental mantener las funciones de los ecosistemas y la biodiversidad que sustenten su oferta de manera sostenible (Lawler et al., 2014; Cavender-Bares et al., 2015). Por ello, se están generando una serie de medidas para restaurar ecosistemas degradados con el objetivo de restablecer y conservar la prestación de sus servicios, buscando al mismo tiempo contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La restauración en su concepción más “purista” tiene como propósito devolver la estructura, función y proceso de los ecosistemas a su condición “natural” o de referencia (Block et al. 2001). Sin embargo, en un cambio de paradigma, la restauración ecológica

está evolucionando, y ya no solo comprende objetivos de una restauración ecológica a una condición “natural”, sino que ha incorporado la restauración de ambientes degradados con fines productivos (Choi, 2007). Para ello, la restauración ecológica incluye diversos grados, tales como la rehabilitación, recuperación, revegetación, remediación, entre otros (Bradshaw, 2002). En este marco, la restauración funcional del paisaje forestal¹ (RFPF o FLR, por su siglas en inglés) constituye una opción para hacer frente a la continua deforestación y degradación forestal (Mansourian et al., 2017). La RFPF se define como “un proceso planeado que busca recuperar la integridad ecológica y mejorar el bienestar humano en paisajes deforestados o degradados” (Dudley y Aldrich, 2007, p. 3). La intención no es convertir un paisaje entero en un bosque “natural”, sino más bien asegurar que la funcionalidad ecológica y la productividad de las tierras deforestadas y degradadas sean mejoradas en beneficio de las poblaciones humanas y de la biodiversidad (Stanturf et al., 2014; Chazdon et al., 2017; Mansourian, 2017).

El término RFPF surgió al reconocer que la restauración debe ir más allá de la restauración ecológica a pequeña escala (Mansourian, 2017). Se enfoca en una restauración de paisaje, conciliando entonces actividades de restauración forestal con otros usos de suelo (Latawiec et al., 2015; Reed et al., 2016). Por lo tanto, un enfoque a escala del paisaje incluye tanto ecosistemas naturales como tierras agrícolas, y áreas con restauración activa o pasiva (Chazdon y Laestadius, 2016).

Las acciones de la RFPF permiten proteger e incluso rehabilitar la provisión de bienes y servicios ecosistémicos generados por los procesos ecológicos (Brauman et al., 2007; van Dijk y Keenan, 2007; Fernández-Moya et al., 2014). Lo mismo sucede con la restauración pasiva o activa de los ecosistemas naturales y los componentes productivos, tales como las plantaciones forestales o los sistemas agroforestales (Durán Zuazo y Rodríguez Pleguezuelo, 2008; Tschardt et al., 2011; De Beenhouwer, Aerts y Honnay, 2013). En este sentido, una ventaja adicional que ofrece la restauración productiva del paisaje es que permite mejorar los servicios de abastecimiento (producción agropecuaria, madera, entre otros) y servicios reguladores y culturales (p. ej., belleza paisajística, calidad del agua o control de inundaciones, entre otros) (Rodríguez et al., 2006; Raudsepp-Hearne, Peterson y Bennett, 2010; Cavender-Bares et al., 2015).

La RFPF es una estrategia que permite abordar los desafíos actuales asociados con el uso de suelo, tanto en lo ecológico como en lo social y económico; por ello, es de interés de muchos tomadores de decisiones de diferentes sectores de la economía (Mansourian et al., 2017). La restauración funcional del paisaje ofrece la oportunidad de detener una potencial cadena de degradación y pérdida ecológica, en un estímulo para la generación de múltiples beneficios económicos y ambientales. Por ejemplo, los paisajes restaurados contribuyen a la estabilidad y bienestar de los medios de vida y la conservación de la naturaleza, mediante el secuestro de carbono, la reducción de la erosión del suelo, la conservación de su humedad y fertilidad, la provisión de hábitat para la vida silvestre, la seguridad hídrica y la provisión de productos forestales (p. ej. madera, leña y carbón).

Debido a esta serie de ventajas existe un movimiento mundial a favor de la RFPF que se concretó el 1 de marzo de 2019 con la Declaración de la Década de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas 2021-2030. Dicha iniciativa es parte de una amplia agenda internacional para contribuir a disminuir la pobreza, mejorar la protección ambiental y aumentar el bienestar humano, metas planteadas por los distintos

¹ Chazdon y Laestadius (2016, p. 1870), mencionan que “los términos rebrote, plantación de árboles, restauración, rehabilitación y reforestación probablemente serán utilizados como sinónimos en un contexto político, sin importar si el objetivo es recrear, si los árboles son exóticos o nativos, o si crecen en monocultivos comerciales, sistemas silvícolas mixtos, regeneración natural o sistemas agroforestales”.

Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, que rápidamente han estado tomando impulso (Brancalion y Chazdon, 2017).

Muchos países en el marco de sus agendas de desarrollo y conservación sostenible están elaborando planes, estrategias y políticas de restauración nacionales y/o sub-nacionales, buscando incorporar aquellas acciones específicas de restauración que contribuyan también al cumplimiento de sus compromisos de reducción de emisiones de carbono (Pinto et al., 2014; Murcia et al., 2016; Chazdon et al., 2017). En reconocimiento a estas oportunidades integradas, el Desafío de Bonn fue lanzado a escala global en 2011 (Chazdon y Laestadius, 2016). Es así, como se definió como primera meta, restaurar de forma global, 150 millones de hectáreas deforestadas y degradadas para 2020. En 2014 la ambición de esta meta aumentó a un total de 350 millones de hectáreas restauradas para 2030. A la fecha, 61 países se han sumado a este desafío con 74 compromisos (The Bonn Challenge, 2019).

Para alcanzar los objetivos de restauración establecidos, los gobiernos y otras partes interesadas deberán definir sus objetivos de restauración e inversiones requeridas y, dados los recursos limitados, priorizar qué áreas deben ser atendidas (Gourevitch et al., 2016). Dadas las restricciones monetarias, también se requiere de una cuidadosa selección de las áreas prioritarias para la restauración (Mansourian et al., 2017). De tal manera, la información sobre los servicios que proveen los ecosistemas es un insumo importante para comunicar los beneficios potenciales de la restauración y una opción es hacerlo mediante la RFPP. Además, el concepto de RFPP, con su visión de paisaje puede facilitar el diseño de estrategias espaciales, en particular la priorización de áreas, y evaluar el efecto de estas estrategias sobre los paisajes y sus mosaicos para proporcionar bienes y servicios (Bockstael et al., 1995; de Groot et al., 2010; Gourevitch et al., 2016). Este proceso permite visibilizar los beneficios directos para poblaciones humanas y, por ende, apoyar la toma de decisiones.

En este estudio estimamos el impacto potencial de las actividades de RFPP sobre la provisión de los servicios ecosistémicos, con el interés de informar a los tomadores de decisiones y ejecutores de programas, la oportunidad que tiene el país de cumplir con sus compromisos nacionales con el Desafío de Bonn. A lo largo de este estudio solo se mide el impacto que puede ser generado por actividades de RFPP y, se asume que los cambios en el uso de suelo diferentes a los considerados bajo la RFPP, u otras variables de influencia, se mantienen iguales.

2 Programas y acciones de restauración de Costa Rica

Costa Rica cubre una superficie terrestre de 51.100 km² y alberga aproximadamente el 4,5% de la biodiversidad mundial (el país con más especies por km² del planeta) y una amplia variedad de ecosistemas, desde páramos hasta bosques húmedos y secos, y una gran cantidad de humedales (SINAC, 2017a).

El gobierno costarricense comprometió un millón de hectáreas con el Desafío de Bonn en 2012 (Bonn Challenge, 2017b) equivalente al 19,6% de su superficie terrestre. Con ello, busca mejorar la calidad y resiliencia de los ecosistemas y medios de vida rurales. En agosto de 2014 la UICN, Oficina para México, América Central y el Caribe (UICN-ORMACC), inició la implementación de una evaluación ROAM² para contribuir al logro de dicho compromiso. Con el fin de anclar este proceso en la institucionalidad nacional, se estableció un comité de expertos en restauración, integrado por representantes del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), IUCN-ORMACC, entre otros (Anexo 1). Su primer objetivo fue realizar una propuesta de acciones de restauración con sus respectivas metas, en hectáreas, para ser restauradas (Comité Técnico, 2016)³. El Comité identificó la necesidad de capitalizar sobre los programas ya existentes con componentes de restauración: 1) el Programa Nacional de Pagos por Servicios Ambientales (PPSA); 2) las Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA, por sus siglas en inglés) y, 3) los programas para la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) (Cuadro 1).

El PPSA fue lanzado en 1997 con la Ley Forestal (No. 7575, 1996) proporcionando la base regulatoria. Costa Rica fue el primer país en el mundo en desarrollar un programa nacional de pagos por servicios ambientales (Pagiola, 2008), y se considera el pilar para que Costa Rica alcance una reforestación neta (Arriagada et al., 2012; Robalino y Pfaff, 2013). A través del PPSA, los propietarios reciben un pago anual por la conservación de tierras forestales, a través de plantaciones forestales, actividades de regeneración natural y de manejo forestal. Los incentivos también se desembolsan a los propietarios de tierras para poner en funcionamiento los sistemas agroforestales (FONAFIFO, 2014; Nieters et al., 2016). El PPSA tiene como objetivos, de acuerdo con la Ley Forestal (No. 7575, 1996), no solo la mitigación de gases de efecto invernadero, sino también la protección del agua y la biodiversidad, el aumento de productos forestales y la provisión de belleza paisajística.

Mediante las NAMA, Costa Rica ha buscado reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector agrícola. En 2007, como parte de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, anunció el objetivo de convertirse, a 2021, en un país neutral en emisiones de carbono (UNFCCC, 2014). Al ser la agricultura un importante contribuyente de emisiones de gases de efecto invernadero (sobre todo de metano a través del ganado y del óxido nitroso por el uso de fertilizantes nitrogenados (World Bank, CIAT y CATIE, 2014)), el país priorizó el sector agrícola para alcanzar la meta de neutralidad de carbono, en particular los sectores de café, banano, ganado, caña de azúcar, piña y arroz (MINAE e IMN, 2014) y reafirmó este enfoque dentro del Plan de Descarbonización (MINAE, 2018).

Las NAMA son vistas como uno de los instrumentos clave para lograr metas de reducción de emisiones y lograr un

2 El objetivo del proceso ROAM es identificar y analizar áreas de oportunidad para RFPF y priorizar áreas para la implementación de acciones de restauración a escala nacional o subnacional (IUCN and WRI, 2014).

3 La lista también fue propuesta ante la Iniciativa 20x20: Costa Rica | Initiative 20x20 (recuperado el 02/02/2020).

desarrollo bajo en carbono (Boos et al., 2014; Coetzee y Winkler, 2014). A la fecha, Costa Rica viene desarrollando las NAMA para los sectores de ganadería y café, que se enmarcan en la estrategia de Articulación Sectorial Agro-ambiental y de Cambio Climático 2016-2020 y la Estrategia Ganadera de Desarrollo Bajo en Emisiones. Dentro de las NAMA se incluyen medidas para mejorar la competitividad y la sostenibilidad de los sectores mencionados como el fomento de sistemas silvopastoriles, la plantación de árboles en pasturas para proveer sombra al ganado y, de especies fijadoras de nitrógeno. En el caso de plantaciones de café, se trata de fijar dióxido de carbono y reducir el uso de fertilizantes sintéticos.

Además de los beneficios del carbono, las NAMA tienen beneficios ambientales tales como la disminución de la erosión y degradación del suelo, la reducción de la contaminación del agua mediante una aplicación más eficiente de fertilizantes, una mejor conectividad de paisajes enriquecidos para el turismo, entre otros (MINAE, MAG y UNDP, 2014; UNFCCC, 2014; MAG, 2015b; Nieters et al., 2016).

En cuanto a las BPA, se enfocan en el sector piña, palma para aceite, y banano, con la meta de desarrollar prácticas que reduzcan sus emisiones y restauren el funcionamiento del paisaje. Dichas prácticas incluyen, por ejemplo, el manejo de fertilizantes y de residuos de cultivos y la

restauración de bosques ribereños. Vale decir que las BPA tienen potencial para su replicación en otros cultivos, sobre todo aquellos asociados al manejo de fertilizantes y la silvicultura (World Bank, CIAT y CATIE, 2014) (Cuadro 1). Los beneficios ambientales de las BPA son similares a los de las NAMA mencionados anteriormente.

Varios aspectos de los PPSA, las NAMA, y las BPA están asociados a prácticas de RFPF. Por ejemplo, se trata de RFPF en áreas de protección de fuentes de agua establecidas en el artículo 33 de la Ley Forestal (N° 7575, 1996) que consisten en áreas de amortiguamiento adyacentes a bosques primarios o secundarios y de ambientes frágiles con poblaciones humanas; la reforestación de zonas no aptas para el cultivo en un mínimo recomendado del 25% del total de la finca, como medidas de control de erosión; la delimitación de corredores que permitan la interacción entre áreas protegidas; el manejo de pendientes para evitar la erosión; la no destrucción de la belleza escénica; y el establecimiento de franjas de árboles o arbustos que atraviesen el cultivo y que incluso puedan atraer insectos benéficos para el control de plagas (MAG, 2010; García Muñoz y Rodríguez Murillo, 2011). Hoy en día, la planificación multisectorial necesaria para alcanzar los objetivos de restauración se articula dentro de la Estrategia Nacional de Restauración de Paisajes de Costa Rica 2021-2050 (MINAE, Sistema Nacional de Áreas de Conservación SINAC, Ministerio de Agricultura de Costa Rica, 2021).

Cuadro 1 Acciones de restauración consideradas para la evaluación ROAM en Costa Rica.

Programa	Uso actual de la tierra	Acción de restauración
NAMA Ganadería	Pastos para ganado lechero	Sistema silvopastoril con rotación
	(pastos por encima de los 1000 m de altura)	(setos vivos)
	Pastos para ganado vacuno cárnico	Pasturas mejoradas con intensificación y rotación, y sistema silvopastoril
	(pastos debajo de los 1000 m de altura clasificados como aptos para la agricultura)	(setos vivos y árboles en pasturas)
	Pastos para ganado vacuno cárnico	Abandono de pastizales y regeneración natural pasiva
	(pastos por encima de los 1000 m de altura clasificados como aptos para la silvicultura)	
PPSA	Pastos (pastos que no están incluidos en el área de trabajo de NAMA Ganadería)	Plantaciones forestales
NAMA Café	Café con sombra	Manejo de fertilizantes e implementación de sistemas agroforestales donde aún no existen
	Café sin sombra	
Buenas prácticas de agricultura	Piña	Siembra en contorno y manejo de residuos de cultivos
	Palma para aceite	Manejo de fertilizantes
	Banano	Manejo de fertilizantes
	Banano, palma de aceite y piña	Restauración de bosques ribereños.

Fuente: Basado en la propuesta del Comité Técnico (2016).

El Comité Técnico (2016) además de identificar los programas ya existentes en Costa Rica para alcanzar el compromiso ante el Desafío de Bonn, también definió las metas en número de hectáreas por restaurar para cada acción⁴ de restauración. Estas metas se definieron basados en los programas existentes, los resultados del proceso del ROAM de Costa Rica (el proceso de planeación de oportunidades de restauración desarrollado con actores locales y acompañado por la UICN (IUCN y WRI, 2014)), y en función de su contribución al compromiso con el Desafío de Bonn. Estas metas están descritas en el Cuadro 2.

Aunque los programas y acciones de restauración mencionados forman parte de la meta de neutralidad de carbono de Costa Rica, se espera que se generen beneficios ambientales adicionales. Para complementar los análisis de carbono ya realizados para estos programas, y como parte de la aplicación ROAM en el país, este estudio tiene dos objetivos: 1) estimar el impacto de las diferentes acciones de restauración sobre la calidad del agua y, 2) priorizar las áreas por restaurar que acerquen a Costa Rica al cumplimiento de su compromiso ante el Desafío de Bonn y que, al mismo tiempo, mejoren la calidad hídrica.

Cuadro 2 Metas propuestas¹ en ha para lograr el compromiso de Costa Rica con el Desafío de Bonn

Uso actual del suelo	Transición	Metas ^a (ha)	Área total de uso de la tierra actual ^b (ha)
Pastos para ganado lechero	Sistema silvopastoril	100.000	310.000
Pastos para ganado vacuno cárnico	Pastizales mejorados y sistema silvopastoril	255.000	327.000
Pastos de ganado vacuno cárnico	Regeneración natural	100.000	134.000
Pastos (pastos que no están incluidos en el área de trabajo de NAMA Ganadería)	Plantaciones forestales	70.000	280.000
Café con sombra	Manejo de fertilizantes	25.000	90.000
Café sin sombra	Sistema agroforestal y manejo de fertilizantes		
Piña	Contorno y manejo de residuos de cultivos	6250	48.000
Palma para aceite	Manejo de fertilizantes	6250	59.000
Banano	Manejo de fertilizantes	6250	72.000
Piña, palma para aceite y banano	Restauración de bosques ribereños	6250	8000

1 El Comité Técnico (2016) también propuso metas para el manejo y conservación de bosques secundarios y maduros, con un total de 425.000 ha. García-Rangel et al. (2017) identificaron casi dos millones de ha para la implementación de estas acciones bajo REDD+.

Fuente: a. Comité Técnico (2016) y b. Elaboración propia.

⁴ Los objetivos oficiales pueden cambiar a través de diferentes procesos políticos mientras se desarrolla la estrategia de restauración. Actualmente, solo la NAMA Café tiene un objetivo oficial de 25.000 hectáreas (Nieters et al., 2016).

3 Análisis del impacto en la provisión de servicios ecosistémicos

El primer objetivo de este estudio es evaluar el impacto de las acciones de restauración propuestas sobre la calidad hídrica. En específico evaluamos hasta qué punto las acciones de restauración incrementan la capacidad del suelo de retener sedimentos y nutrientes, una mayor retención podría contribuir a mejorar la calidad del agua. La retención de sedimentos y nutrientes es común clasificarla dentro de los servicios ecosistémicos hidrológicos (Brauman et al., 2007; de Groot et al., 2010; Terrado et al., 2014), y se refieren a los beneficios que las poblaciones humanas reciben del funcionamiento de los ecosistemas terrestres sobre el agua dulce (Brauman et al., 2007). Los servicios ecosistémicos hidrológicos son importantes para atender necesidades humanas desde el suministro de agua y, otros usos, como la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica (Goldstein et al., 2017).

El análisis de retención de sedimentos evaluó la contribución de las diferentes acciones de restauración a la capacidad del suelo de retener sedimentos y, por lo tanto, reducir su exportación a los arroyos y los ríos (Tscharntke et al., 2011; Fernández-Moya et al., 2014; Guerry et al., 2015; Goldstein et al., 2017). El análisis de retención de nutrientes, por su parte, evaluó el impacto de las acciones de restauración en la capacidad del suelo de retener nitrógeno y fósforo provenientes de fertilizantes (Scherr and McNeely, 2008; Power, 2010; Kovacs et al., 2013).

Para estimar los cambios en la provisión de servicios de retención de sedimentos y nutrientes que resultan de las diversas acciones de restauración, se utilizó la herramienta de Evaluación Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones 3.2⁵ (InVEST, por sus siglas en inglés) (Sharp

et al., 2016). InVEST es una herramienta espacial explícita que cuantifica los diversos servicios de los ecosistemas utilizando datos, relaciones biofísicas y económicas para estimar niveles biofísicos y valores económicos (Terrado et al., 2014). Básicamente, InVEST proporciona información sobre cómo los cambios en los ecosistemas conducen a cambios en los flujos de beneficios para las personas, por lo tanto, permite tomar decisiones sobre el manejo de recursos naturales (Sharp et al., 2016). Para medir los impactos en los servicios de retención de sedimentos y nutrientes, se utilizaron dos de los modelos de InVEST: *Sediment Delivery Ratio* (SDR) (proporción de exportación de sedimentos) y *Nutrient Delivery Ratio* (NDR) (proporción de exportación de nutrientes).

3.1 Exportación de sedimentos (modelo SDR)

El objetivo del modelo SDR es mapear el origen y llegada de sedimentos terrestres a cuerpos de agua (Sharp et al., 2016). Para este fin, el modelo se basa en la ecuación de suelo universal (USLE, por sus siglas en inglés) revisada para representar los sedimentos que provienen de la erosión del flujo laminar (Vogl et al., 2016), es decir; el sedimento que fluye debido a la escorrentía del agua. El modelo calcula la forma en que el suelo erosionado se desvía por una vía de flujo para obtener la proporción de sedimentos que llega a ríos y arroyos (Kovacs et al., 2013; Terrado et al., 2014).

Los insumos requeridos comprenden datos espaciales, valores para la ecuación USLE, e información sobre la capacidad de retención de sedimentos del suelo y de la cobertura de

5 La herramienta InVEST es un software con una serie de modelos que permiten medir la prestación de servicios de los ecosistemas. Fue desarrollado por el Natural Capital Project (<https://www.naturalcapitalproject.org/>).

InVEST es libre y de acceso abierto, tiene requisitos de datos relativamente bajos y es muy adecuado para grandes escalas espaciales (Sharp et al., 2016).

suelo (Sharp et al., 2016). Entre los datos espaciales requeridos se encuentran, por ejemplo, el mapa de uso del suelo y de cobertura, de elevación y precipitación, entre otros, que informan el origen de sedimentos y su movimiento a cuerpos de agua (Mapas 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6). Entre los datos no espaciales se encuentran otros datos biofísicos, en particular los valores de la ecuación USLE (Anexo 2 y Cuadros del A1 al A4). Por ejemplo, el factor P en la ecuación es un valor que representa las prácticas agrícolas usadas (p. ej. agricultura de contorno) para reducir la escorrentía del agua y, por lo tanto, la cantidad de erosión. Es importante notar que mientras el modelo cuantifica todo sedimento que llega al agua de una determinada área terrestre, la simplificación del modelo le obliga a ignorar terrenos irregulares que impiden el paso de sedimentos u otras fuentes como, por ejemplo, barrancos o deslizamientos.

3.2 Exportación de nutrientes (modelo NDR)

La exportación de nutrientes se refiere a la cantidad de nutrientes de fuentes naturales y/o antropogénicas, de un determinado uso del suelo, que se movilizan debido a los efectos de la erosión hídrica (Toft et al., 2013). El objetivo del modelo NDR es mapear las fuentes de nutrientes de las cuencas hidrográficas y su transporte a las fuentes de aguas superficiales, así cuando llegan a un cuerpo de agua, el modelo no asume ninguna retención o remoción adicional (Kovacs et al., 2013). El modelo NDR fue diseñado para el nitrógeno y el fósforo (Sharp et al., 2016). En este estudio, centrado en la restauración de sistemas de producción agrícola, las principales fuentes de nutrientes consideradas son: la aplicación de fertilizantes, estiércol y vegetación (residuos de basura y de



Mapa 1.1 Uso del suelo-cobertura.

Fuente: INBio, 2011.



Mapa 1.2 Subcuencas.

Fuente: TEC, 2014.



Mapa 1.3 Mapa elevación digital.

Fuente: ITCR, 2014.



Mapa 1.4 Factor de erodabilidad (K).

Fuente: Elaboración propia basado en CIA, 2014 and Sparp et al., 2016.



Mapa 1.5 Precipitación promedio anual.

Fuente: Worldclim, 2016.



Mapa 1.6 Índice de erosión pluvial (R).

Fuente: Elaboración propia basado en Calvo-Alvarado et al., 2014.

cultivos, entre otros). Las acciones de restauración modeladas tendrán un impacto tanto en la cantidad de nutrientes adicionales, como en la reducción de la aplicación de fertilizantes sintéticos y en la capacidad de los ecosistemas para retener o filtrar el exceso antes de llegar a las corrientes de agua (Kovacs et al., 2013; Sharp et al., 2016; Goldstein et al., 2017).

Para estimar la retención de nutrientes resultante de las acciones de restauración, se utilizaron datos de cantidades de nitrógeno y fósforo aplicados en los diferentes cultivos o por el ganado como parte de procesos naturales, así como las capacidades de infiltración o coeficientes de retención para cada tipo de uso de suelo (Kovacs et al., 2013; Sharp et al., 2016). Tanto el modelo como los datos utilizados son similares al modelo SDR (véase Sección 3.1) con algunas diferencias notables. Por ejemplo, este modelo requiere datos sobre el monto de nutrientes aplicados en cada clase de uso de suelo (kilogramos de nutrientes aplicados por hectárea al año) y la máxima eficiencia de retención de nutrientes de cada uso de suelo (p. ej. la máxima eficiencia de retención de nutrientes de vegetación natural como bosques es de 60-80%). Estos y otros datos utilizados para correr este modelo se detallan en los Mapas 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 y en los Cuadros A1 al A4 del Anexo. Para más detalles sobre los modelos SDR y NDR, referirse a la guía del usuario de InVEST (Sharp et al., 2016).

3.3 Mapas de impacto potencial

Se estimó el potencial que tiene cada acción de restauración para mejorar la calidad del agua calculando la diferencia entre la exportación de sedimentos y nutrientes, a las fuentes de agua superficiales, bajo el escenario “actual” (representado por el mapa de uso antes de la restauración, Anexo 2, Cuadro A1); y del escenario “restaurado”, representado por los mapas modificados para simular las acciones de restauración, una vez implementadas (Anexo 2, Cuadro A4). Siguiendo a (Gourevitch et al., 2016), otros factores climáticos y paisajísticos, como la pendiente y la conectividad hidrológica, se asumieron iguales en el escenario “actual” y en el escenario “restaurado”.

La descripción de los usos actuales de suelo en el escenario “actual” puede ser compleja dado los múltiples usos agrícolas en una misma categoría. Para simplificar este proceso se asumió un sistema de producción específico por cada categoría de uso de la tierra, basado en los promedios de estadísticas nacionales. Por ejemplo, para evaluar la carga de nitrógeno en fuentes de agua, que provienen de pastos para ganadería, solo se tomó un promedio general de todas las variaciones, en lugar de considerar la aplicación de fertilizantes por área, elevación o región.

Solo se consideró una acción de restauración por cada categoría de uso de suelo (Anexo 2, Cuadro 1) y para poder

modelar su impacto solo se modificó el mapa actual de cobertura y de uso de la tierra, de acuerdo con sus respectivas actividades de restauración⁶ (Mapa 1.1).

En un primer paso para la categoría de uso de suelo “pastos”, se realizó una separación entre los pastos ubicados dentro del área designada para la implementación del programa NAMA y los de fuera de ella. Los pastos dentro de la NAMA Ganadería fueron divididos en función de la altitud: pastos por encima de 1000 m.s.n.m. que son exclusivos para ganado lechero, y los de debajo de los 1000 m.s.n.m. que se destinan para la crianza de ganado vacuno de carne y de doble propósito. Dentro de esta última área se identificaron las categorías aptas para la agricultura o para la silvicultura (CCT-MAG, 2005).

Para la NAMA Café no fue posible disponer de mapas que permitieran diferenciar entre las plantaciones de café a pleno sol y las de café bajo sombra. Sin embargo, se dispone de datos sobre el porcentaje de cada tipo de sistema de producción en siete de las regiones de Costa Rica (Anexo 2, Cuadro A3). De esta manera, el área cafetera se dividió entre café a pleno sol y café bajo sombra, según la información de las siete regiones. Los datos biofísicos para el uso actual de la tierra (Anexo 2, Cuadro A1) se basaron en una media ponderada de los datos biofísicos del café al sol y bajo sombra para cada región (Anexo 2, Cuadro A2).

Finalmente, para analizar el impacto de la restauración de los bosques ribereños, en los mapas con los escenarios de restauración, se colocó un área de amortiguamiento de 15 metros⁷ a lo largo de los ríos primarios y secundarios de las plantaciones de banano, palma de aceite y piña.

Solo se generaron mapas potenciales de impacto para identificar las áreas prioritarias de cada acción de restauración con base en su provisión de servicios ecosistémicos hídricos. Si se implementa la acción de restauración se reflejará, en cada píxel del mapa, el cambio esperado en la exportación de sedimentos y nutrientes (Natural Capital Project e IUCN, 2017).

Para obtener los mapas de potencial de impacto, el modelo InVEST fue utilizado en dos escenarios diferentes: primero, los modelos SDR y NDR se ejecutaron bajo el escenario “actual” (mapas antes de la restauración) y; segundo, usando los escenarios⁸ “restaurados”.

6 Los datos espaciales fueron creados y modificados usando ArcGIS y QGIS.

7 Los 15 metros de amortiguamiento corresponden a la regulación de Costa Rica establecidas en el artículo 33 de la Ley Forestal (N° 7575, 1996).

8 El modelo SDR se ejecutó siete veces, el modelo NDR nueve veces, ya que la única acción considerada en las plantaciones de banano y aceite de palma es la gestión de fertilizantes, que no tiene un impacto en el estado actual de erosión.

Para finalizar, los mapas potenciales de impacto se crearon calculando la diferencia de los resultados espaciales entre el escenario “actual” y el escenario “restaurado” (Figura 1). El resultado es el mapa de impacto potencial de una acción de restauración dada sobre la exportación de sedimentos, nitrógeno o fósforo (Natural Capital Project e IUCN, 2017).

Con los modelos InVEST, se generaron tres mapas de impacto potencial para cada acción de restauración⁹: (1) cambio en la exportación de sedimentos; (2) cambio en la exportación de nitrógeno y; (3) cambio en la exportación de fósforo.



Figura 1 Mapa de cálculo de impacto potencial.

Fuente: Elaboración propia.

⁹ Para las acciones en las plantaciones de banano y aceite de palma solo se crearon dos mapas de posibles impactos.

4 Beneficiarios

Los mapas de impacto potencial permiten identificar las áreas del país donde las acciones de restauración tendrían una mayor reducción¹⁰ en la exportación de sedimentos y nutrientes. Las áreas prioritarias para los servicios ecosistémicos hidrológicos fueron definidas como aquellas áreas que proporcionan los mayores beneficios en términos de cantidad y calidad del agua para la población humana (Goldstein et al., 2017).

Los cambios modelados con InVEST permiten dimensionar diferentes tipos de impacto que se valoran con base en una disminución en el costo de la purificación del agua potable, o en que las áreas identificadas actúen como reservorio debido a una menor sedimentación (Lele, 2009). Siguiendo la definición de (Fisher, Turner y Morling, 2009) y (Jax et al., 2013), los servicios ecosistémicos permiten priorizar las áreas para el desarrollo de las acciones de restauración, y se considera no solo el impacto modelado con InVEST, sino también la ubicación de los potenciales beneficiarios de los cambios en la exportación de sedimentos y nutrientes. En específico este estudio considera los beneficios potenciales para la producción de energía hidroeléctrica, la calidad del agua potable y la reducción de la degradación de los humedales.

4.1 Producción hidroeléctrica

El control de la erosión es un servicio ecosistémico importante para el sector hidroeléctrico, pues concentraciones

altas de sedimentos en los cauces de agua disminuyen la producción de electricidad (Vogl et al., 2016; Goldstein et al., 2017). Las áreas prioritarias para la reducción de la exportación de sedimentos incluyen zonas de las cuencas que fluyen hacia las subcuencas hidrográficas que alimentan las plantas hidroeléctricas (Mapa 1). Estas áreas se identificaron primero localizando las plantas de hidroelectricidad que están operando o que estaban en construcción cuando se diseñó el mapa de localización (Anexo 3, Mapa A1). En el Mapa 1 se muestra la ubicación de las centrales hidroeléctricas, pero es importante mencionar que esta ubicación no corresponde en específico al punto de donde se extraen sus aguas. Como indicador de los puntos de extracción de agua se utilizaron los ríos más cercanos a cada planta. Para delinear las “áreas de servicio” que alimentan las fuentes de agua en la producción de hidroelectricidad¹¹, se empleó la herramienta *DelineateIT* de InVEST¹², como insumos se utilizaron las ubicaciones aproximadas de los puntos de extracción de agua y el modelo de elevación digital de Costa Rica (Mapa 1.3 apartado anterior).

4.2 Agua potable

La retención de sedimentos y nutrientes puede prevenir la contaminación del agua superficial y mejorar su calidad para el consumo humano (Goldstein et al., 2017). Se crearon dos mapas para identificar las áreas prioritarias que contribuirían a mejorar la calidad del agua para el consumo humano. El primero (Mapa 2) muestra por distrito el número de personas que dependen de aguas superficiales no tratadas (INEC,

10 La única excepción es la implantación de sistemas silvopastoriles con mejoramiento de pastizales en pastos para bovinos y bovinos de doble propósito. Dado que esta acción se acompaña de un aumento del número de cabezas de ganado en un área determinada, aumenta la carga de nitrógeno y fósforo. En este caso, se priorizarán las áreas con el menor incremento. Si bien esta acción de restauración podría tener un impacto negativo, la propuesta del (Comité Técnico, 2016) es que la intensificación se realice en conjunto con el abandono de pastos en otras áreas, para compensar el impacto.

11 Una zona de servicio es similar a una cuenca y esboza el área donde los cambios de un proceso biofísico particular afectarán a las personas, infraestructura u otros beneficiarios (Natural Capital Project and IUCN, 2017).

12 <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/delineateit.html>



Mapa 1 “Áreas de servicio” que alimentan las fuentes de agua usadas en la producción de hidroelectricidad.

Fuente: Elaboración propia, basado en Ortiz Malavassi, 2009.

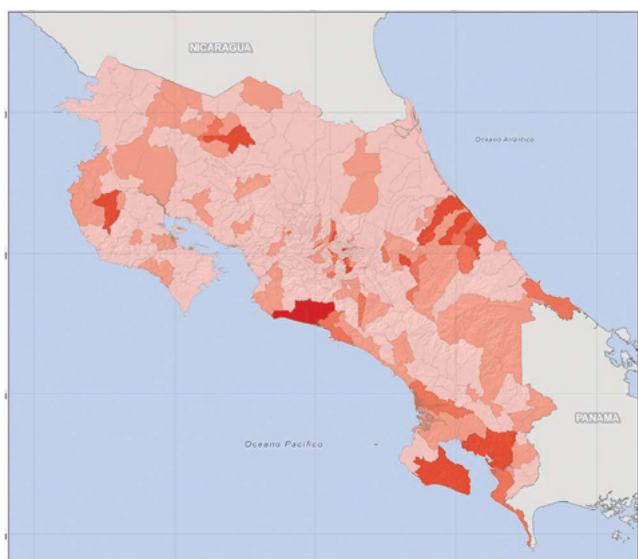
2011). Esto permite identificar áreas prioritarias para mejorar la calidad del agua por efecto de las acciones de restauración. Un segundo mapa (Mapa 3) presenta la ubicación de las fuentes superficiales para la extracción de agua potable (DA, 2016). Con ambos mapas se localizan áreas prioritarias con un mayor número de beneficiarios en relación con la calidad del agua para el consumo humano y, no solo teniendo en cuenta una mayor retención de sedimentos o de nutrientes; asimismo, se incluye el impacto de la reducción de la carga de nitrógeno (Lager y Wikström, 2007; Guevara y Herrera Murillo, 2014).

4.3 Humedales

En el Mapa 4 de beneficiarios, que se considera para la priorización, se muestra la ubicación de los humedales de Costa Rica (SINAC, 2007). Los humedales proporcionan una serie de servicios ecosistémicos como la protección contra tormentas, como depósitos de agua o como sumideros de los gases de efecto invernadero (Leibowitz, 2003; Rusi et al., 2013). Uno de los servicios ecosistémicos más importantes es su función como filtro de contaminantes que, por ende, mejora la calidad del agua (Knight et al., 2000; Mitsch, Horne

y Nairn, 2000; Leibowitz, 2003). Los beneficiarios humanos de los servicios ecosistémicos de los humedales van desde los grupos locales hasta alcanzar una escala mundial. Es decir, las personas que aprovechan el agua limpia a causa de las propiedades filtrantes de los humedales son, por lo general, beneficiarios locales que viven en zonas aledañas, mientras que las personas a escala mundial se benefician de la capacidad de los humedales de almacenar carbono.

A pesar de que los servicios ecosistémicos de los humedales podrían ser muy beneficiosos, en especial para comunidades aledañas, muchos humedales en Costa Rica están degradados y sufren de contaminación por diversas sustancias como el fósforo (Tabilo-Valdivieso, 1997; Varnell, Thawaba y Solis, 2010; Sasa et al., 2015). Por tal motivo, en este estudio se consideraron los humedales para identificar las áreas prioritarias de restauración. Sin embargo, no existe información específica sobre quienes son sus beneficiarios (p. ej. aquellas comunidades que obtienen agua de mejor calidad gracias a los humedales). Por esta razón, se tomó la ubicación de los humedales (Mapa 4) como representación potencial de los beneficiarios con la reducción en la exportación de fósforo, gracias a las acciones de restauración.



Mapa 2 Población sin acceso a agua potable. Del color oscuro al claro se representan los distritos con más personas sin acceso a agua potable.

Fuente: Elaboración propia, basado en INEC, 2011.



Mapa 3 Las áreas azules representan las áreas que abastecen los puntos de extracción de agua potable.

Fuente: Elaboración propia, basado en DA, 2016.



Mapa 4 Localización de humedales de Costa Rica.

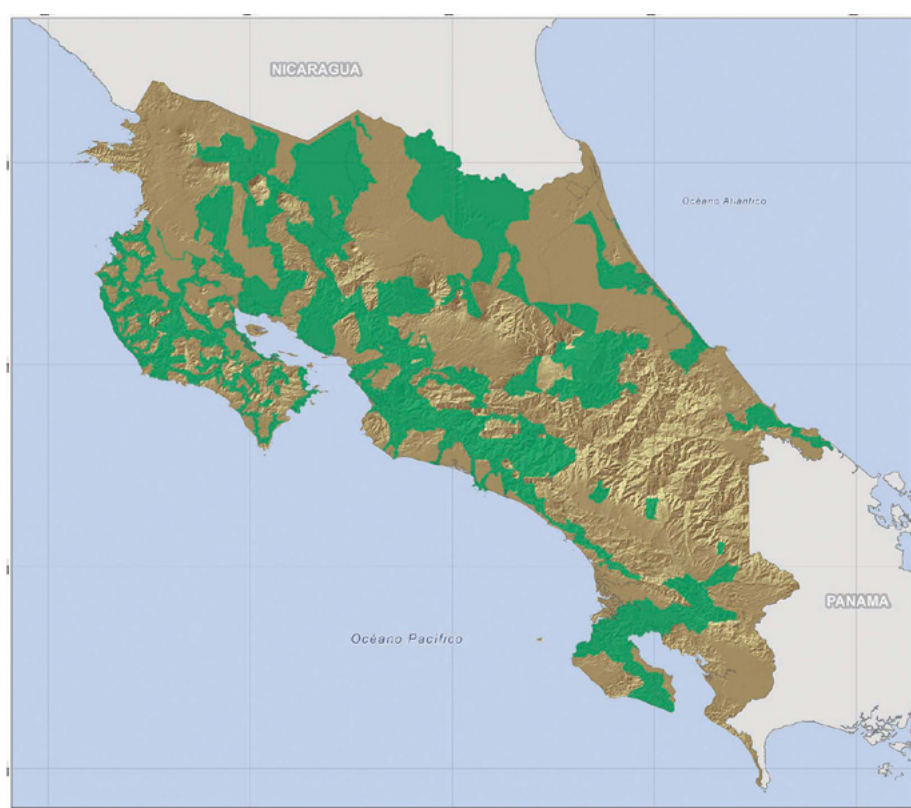
Fuente: SINAC, 2007.

4.4 Corredores biológicos

Aunque los corredores biológicos no están relacionados con los servicios ecosistémicos analizados en este estudio (p. ej. retención de sedimentos, nitrógeno y fósforo), es decir, no se benefician de estos cambios, la conectividad del paisaje es un cobeneficio importante considerado en los programas contemplados en este estudio (MINAE, MAG y UNDP, 2014; UNFCCC, 2014; MAG, 2015b). Elementos naturales del paisaje, como parches forestales, bosques ribereños y cercas vivas, pueden disminuir la fragmentación del hábitat mejorando la conectividad ecológica (Harvey et al., 2005; Fischer, Lindenmayer y Manning, 2006; Seaman y Schulze, 2010). Por lo tanto, la conectividad es uno de los aspectos adicionales que se consideró para la priorización de áreas de restauración. En Costa Rica hay 47 corredores biológicos oficialmente reconocidos que representan el 32% del territorio (SINAC, 2017b). El Mapa 5 muestra la ubicación de estos corredores (SINAC, 2017a), que conectan parches de vegetación natural, facilitan el movimiento de plantas y animales y aseguran la continuidad del proceso ecológico (Chetkiewicz, St. Clair y Boyce, 2006).

4.5 Priorización con base en los beneficiarios

Como el objetivo principal de este estudio es la asignación de prioridades basadas en la provisión de servicios ecosistémicos, los mapas de impacto potencial generados con InVEST se expresan en términos biofísicos y, en espacial, los relacionados con los mapas de beneficiarios (Keeler et al., 2012; Ruckelshaus et al., 2015). Aunque una valoración monetaria sería posible, este proceso requeriría información adicional (Vogl et al., 2016). Además, al establecer prioridades con base en los mapas biofísicos de producción y de beneficiarios, se evita el doble conteo que puede ocurrir potencialmente en la valoración monetaria (Ojea, Martín-Ortega y Chiabai, 2012). De esta forma, se otorgará mayor prioridad a las áreas donde, por ejemplo, se produce una reducción de los sedimentos en los servicios que suministran agua, tanto para la producción de hidroelectricidad, como para el consumo humano.



Mapa 5 Localización de los 47 corredores biológicos de Costa Rica.

Fuente: SINAC, 2017a.

5 Priorización con la Herramienta de Optimización de Restauración Oportuna (ROOT)

Para priorizar las áreas de restauración (tomando en cuenta el impacto en la provisión de servicios ecosistémicos, la ubicación de beneficiarios potenciales, y los corredores biológicos) se utilizó la Herramienta de Optimización de la Oportunidad de Restauración¹³ (ROOT, por sus siglas en inglés). Es una herramienta de software para servicios ecosistémicos que fue creada específicamente para apoyar la planificación de acciones para la RFPF, de esta manera, utiliza una programación de optimización lineal para identificar las áreas con mayor potencial de mejorar la provisión de los servicios ecosistémicos (Natural Capital Project e IUCN, 2017). Este instrumento permite que los usuarios analicen datos, de tal manera, que combinen y ajusten las estrategias y acciones de RFPF, en un área dada, para maximizar los beneficios ecosistémicos como el secuestro de carbono, con un enfoque de necesidades específicas como el mejoramiento de la calidad de agua.

5.1 Optimización con ROOT

El Cuadro 2 detalla las metas, en hectáreas, por restaurar para cada una de las nueve acciones de restauración. ROOT se usó para identificar qué hectáreas priorizar con base en su provisión de servicios ecosistémicos hidrológicos y, al mismo tiempo, cumplir con las metas propuestas por acción. Por ejemplo, el programa NAMA Café tiene como meta restaurar 25.000 de las 90.000 ha de café en Costa Rica. ROOT se usó para identificar cuáles de las 25.000 ha de las 90.000 serían las más indicadas para restaurar.

Para cada una de las metas se hicieron tres tipos de optimizaciones: (1) optimizaciones basadas solo en resultados biofísicos de los mapas de impacto potencial, (2) optimizaciones incluyendo los mapas de beneficiarios y, (3) optimizaciones incluyendo el mapa de corredores biológicos.

5.2 Datos requeridos por ROOT

Para programar y correr ROOT se requiere una serie de datos que se resumen en el Cuadro 3. Para un mayor detalle referirse al manual de ROOT¹⁴.

5.3 El proceso de optimización

El proceso de optimización comienza con el planteamiento del problema que consta de tres componentes: objetivos, limitaciones, y unidades de decisión espacial (Vogl et al., 2017). Los objetivos son las métricas de servicios ecosistémicos que se quieren maximizar o minimizar. En este estudio el objetivo fue minimizar la exportación de sedimentos, nitrógeno, y fósforo. Las limitaciones representan el área que ROOT debe identificar para solucionar el problema de optimización. En este estudio se programó ROOT para identificar un número de hectáreas correspondientes con cada meta (Cuadro 2). Por último, las unidades de decisión espacial (UDE) representan la escala que se usa para decidir en donde se desarrollarán las actividades de restauración. Este estudio utilizó como unidad espacial hexágonos de 400 ha.

13 ROOT fue desarrollado a través de una asociación entre el Natural Capital Project, el Instituto de Medio Ambiente de la Universidad de Minnesota y el Programa de Conservación de los Bosques de la UICN. Disponible en: www.naturalcapitalproject.org/root

14 Disponible en: naturalcapitalproject.stanford.edu/software/root

Cuadro 3. Datos para programar y correr ROOT usados para identificar áreas prioritarias por acción.

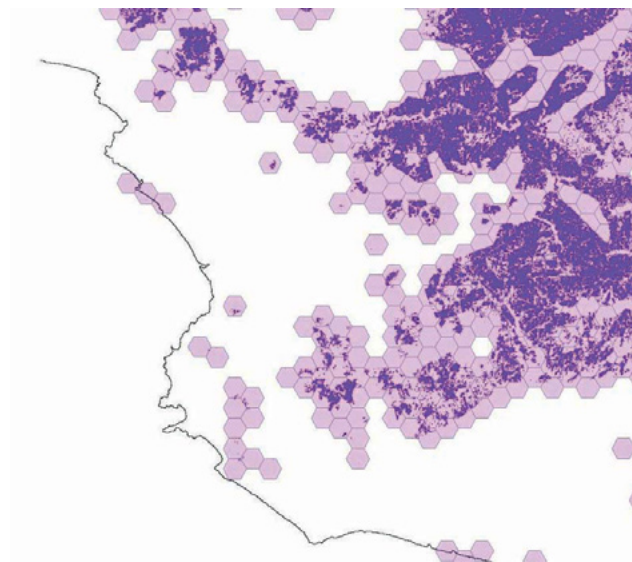
Datos	Definición	Datos usados en el estudio
Objetivos	La medida de servicio ecosistémico a maximizar o minimizar.	ROOT se programó para optimizar áreas de restauración con base en la capacidad de diferentes acciones de restauración de contribuir a la minimización de exportación de sedimentos, nitrógeno, y fósforo.
Limitaciones	Requisitos que la solución optimizada debe cumplir.	Se requirió identificar un número de ha igual al de cada meta propuesta por acción. Por ejemplo, para NAMA café se programó identificar 25.000 ha, la meta de esta acción.
Unidad de decisión espacial	Área que se usa para identificar dónde implementar actividades de restauración.	Se usaron hexágonos de 400 ha.
Máscara de actividad	Capa raster que indica que áreas están en consideración para la intervención.	Se usaron nueve máscaras de actividad, una por cada acción de restauración.
Mapa de impacto potencial	Capa raster que indica los cambios en servicios ecosistémicos que se esperan después de la restauración. Véase Sección 3.3.	Se usaron 27 mapas de impacto potencial, tres (nitrógeno, sedimento, y fósforo) por cada acción de restauración.
Mapa de ponderación espacial	Mapas de beneficiarios que se usan para dar ponderaciones o pesos al mapa de impacto potencial.	Se usaron cinco mapas: <ol style="list-style-type: none"> 1) Cuencas que alimentan las fuentes de agua para producir hidroelectricidad. 2) Áreas de recarga de las fuentes de agua potable. 3) Población dependiente de agua no tratada. 4) Humedales. 5) Corredores biológicos.
Factores compuestos	Especificaciones de qué ponderaciones o pesos se deben aplicar a los mapas de impacto potencial.	Se especificaron las siguientes ponderaciones: <ol style="list-style-type: none"> 1) Mapa de exportación de sedimentos con el mapa de cuencas que proveen agua para producir hidroelectricidad. 2) Mapa de exportación de sedimentos y nitrógeno con el mapa de cuencas que alimentan los puntos de recolección de agua potable, y con el mapa de personas por distrito que consumen agua no tratada. 3) Mapa de exportación de fósforo con el mapa de humedales.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de optimización usando ROOT está dividido en dos etapas. La primera consiste en un preprocesamiento de datos y la segunda en la optimización en sí misma.

Primera etapa: procesamiento de datos

La etapa de preprocesamiento comienza con la creación de unidades de decisión espacial (en este estudio, hexágonos de 400 ha) que cubren todos los píxeles de la máscara de actividad (Mapa 6). Estos hexágonos se crean para agregar los datos espaciales en una misma unidad que facilite la optimización y la selección de las áreas para llevar a cabo las actividades de restauración. En este paso, ROOT agrega todos los valores del mapa de impacto potencial dentro de cada hexágono y, también, calcula la proporción de cada hexágono que se superpone con cada mapa espacial de ponderación (p. ej. los mapas de beneficiarios). Eventualmente, la optimización determina cuales UDE son elegidas para desarrollar las actividades de restauración.



Mapa 6 Unidades de decisión espacial, hexágonos de 400 ha.

Fuente: Elaboración propia.

Segunda etapa: Optimización

ROOT tiene cuatro modos de correr la optimización que se puede elegir de acuerdo con el problema de priorización que se busca resolver. Para este estudio se corrió la optimización en modo “n dim frontier” (fronteras dimensionales), que corresponde cuando son considerados más de dos objetivos en el análisis. Cada análisis de optimización es ejecutado 100 veces. Cada UDE contiene la suma de los impactos potenciales (nitrógeno, sedimento y fósforo) de las actividades de restauración dentro de su respectiva área. Estos valores son modificados por las ponderaciones dadas por los mapas de beneficiarios. En un siguiente paso, ROOT le asigna a cada servicio ecosistémico una ponderación aleatoria de 0 a 1 en cada una de las 100 optimizaciones. Luego, el programa corre una función para maximizar la suma de los objetivos ponderados (los valores de impacto potencial modificado por las ponderaciones de beneficiarios y valores aleatorios), de tal manera, que las hectáreas correspondientes sean identificadas con cada una de las metas.

Fórmula 1.

$$\sum_s \sum_i w_s V_{is} x_i$$

Sujeto a $\sum_i x_i A_i < \text{área meta}$

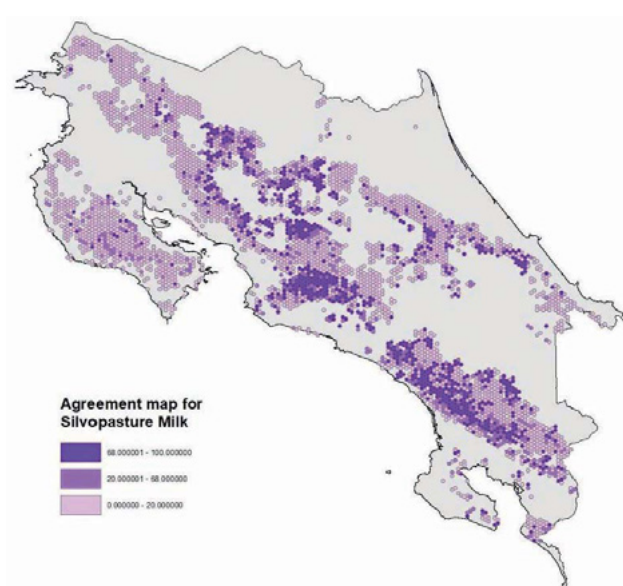
Matemáticamente, el proceso de optimización está denotado por la fórmula 1. ROOT determina si la UDE (x_i) fue elegida o no y cuánta área, por restaurar, se encuentra en cada UDE (A_i) y, así, cumplir con el área meta. Por cada una de las 100 ejecuciones del programa, ROOT le asigna una ponderación aleatoria (w_s) al servicio ecosistémico evaluado. Esta ponderación aleatoria es aplicada al valor resultante de la multiplicación entre los valores del mapa de impacto potencial y las ponderaciones provenientes de los mapas de beneficiarios (V_{is}).

Las últimas áreas elegidas en la priorización pueden estar en dos o más hexágonos que han obtenido el mismo puntaje. Por lo tanto, aparte de las hectáreas señaladas como priorizadas en los resultados, existen otras adicionales que también pudieron ser elegidas. El Anexo 4 presenta el margen de error en los resultados de la optimización por cada acción, que oscila entre 0,00 y 5,71% (véase resultados en el Capítulo 6).

5.4 Resultados de la optimización

Los resultados de la optimización constan de: 1) soluciones de cada una de las 100 optimizaciones, 2) tablas de resumen de cada optimización, y 3) un mapa de consenso.

El mapa de consenso (Mapa 7) se usó para identificar las hectáreas prioritarias por cada acción de restauración, muestra las áreas por priorizar tomando en cuenta los resultados de cada una de las 100 optimizaciones. Asimismo identifica que unidades de decisión espacial se seleccionaron con más frecuencia en las 100 optimizaciones, que equivalen a las áreas de alta prioridad para el desarrollo de las actividades de restauración.



Mapa 7 Mapa de consenso. De color oscuro a color claro, las UDE escogidas con frecuencia alta, intermedia y baja.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, identifica las unidades de decisión espacial escogidas con frecuencia intermedia, que probablemente son beneficiosas para un subconjunto de beneficiarios, pero no para todos. Las UDE que rara vez o nunca se seleccionan, indican las áreas de baja prioridad. Aunque los resultados de ROOT pueden ser expresados en dos categorías (si las

UDE fueron elegidas o no (Figura 2)), es posible tomar estos resultados y hacer una reclasificación con más categorías que podrían ayudar a la toma de decisiones. La Figura 3 muestra una subcategorización que se hizo para este fin. Los resultados de las optimizaciones en la Sección 6 usan ambas categorizaciones.

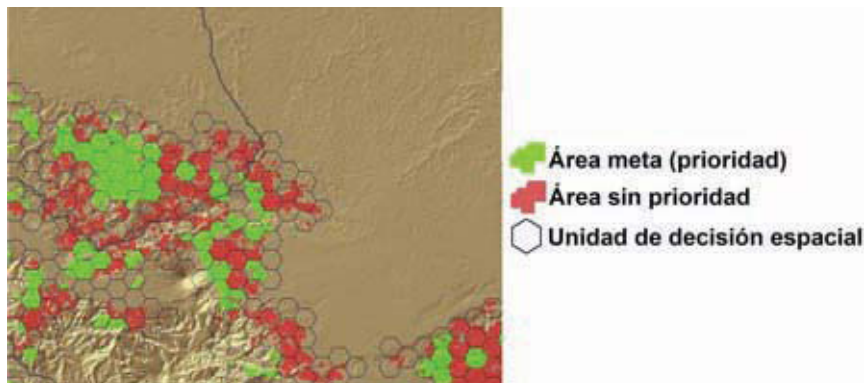


Figura 2 Simbología utilizada en los mapas de optimización de resultados de ROOT para las áreas meta de implementación.

Fuente: Elaboración propia.

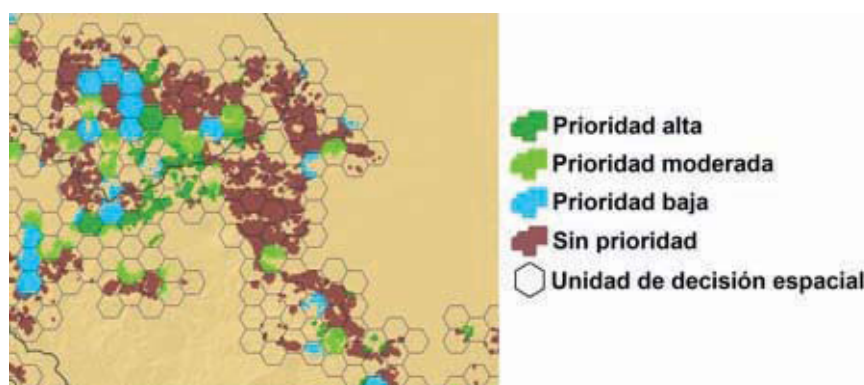


Figura 3 Simbología de clasificación de priorización de resultados ROOT con más clasificaciones.

Fuente: Elaboración propia.

6 Las acciones de restauración y su priorización espacial con ROOT

6.1 NAMA Ganadería en pastos

La agricultura de pastos es uno de los principales usos de la tierra en Costa Rica con fincas ganaderas que ocupan alrededor del 20% del territorio nacional (CCAFS, 2015). En general, los sistemas de producción bovina mantienen una baja intensificación en el uso de la tierra, especialmente en pastos para ganado de carne y de doble propósito¹⁵. El manejo silvopastoril se registra solo en el 5% del área de pastos (MAG, 2015b).

Bajo este escenario, la NAMA Ganadería inició en 2013 como parte de la puesta en marcha de la Estrategia Nacional de Ganadería Baja en Carbono, y fue definida con base en los acuerdos entre el sector privado, público y académico, su cumplimiento se espera para 2034 (MAG, 2017). La NAMA Ganadería se enfoca en un sector más ecocompetitivo, que promueve el uso de tecnologías y prácticas bajas en emisiones, que incluye medidas de transformación, como fertilización mejorada, cercas vivas, adopción de sistemas silvopastoriles, la mejora de los pastos y la división de las áreas de pastoreo¹⁶ (MINAE, MAG y UNDP, 2014; CCAFS, 2015; MAG, 2015a). En específico, el sistema silvopastoril (considerado en este estudio para analizar y priorizar las acciones de restauración como parte de la NAMA Ganadería), incluye cercas vivas de árboles para dividir una hectárea de pasto en varias secciones (véase Anexo, Cuadro A5 para más detalles).

A continuación, se presentan las oportunidades para la ejecución de acciones en zonas de pastos que se ubican dentro del programa NAMA Ganadería. Se identificaron tres categorías de áreas según su localización altitudinal: mayores a 1000 m.s.n.m., menores a 1000 m.s.n.m. que presentan aptitud agrícola, y en alturas menores a 1000 m.s.n.m. que presentan aptitud forestal, pero que están en regeneración natural.

6.1.1 Sistema silvopastoril en pastos ubicados a más de 1000 m.s.n.m. dentro de la NAMA Ganadería

Aquí se presentan los resultados del análisis con ROOT para identificar las áreas óptimas para desarrollar sistemas silvopastoriles en pastos ubicados a 1000 m.s.n.m. dentro de la NAMA Ganadería. Específicamente, este análisis se enfocó en pastos para ganado lechero en áreas señaladas por el Mapa 8.

El Mapa 9 muestra el impacto en la exportación de sedimentos después de llevar a cabo sistemas silvopastoriles en todas estas áreas, mientras que el Mapa 10 muestra el impacto en la exportación de nitrógeno y el Mapa 11 el del fósforo.

Como se puede observar en los mapas 9, 10 y 11, la puesta en marcha de los sistemas pastoriles en suelos ubicados a 1000 m.s.n.m. que, en la actualidad, cultivan pastos para ganado lechero (NAMA Ganadería), siempre da como resultado la disminución de la exportación de sedimento, nitrógeno, y fósforo. Al mismo tiempo se puede notar que esta exportación no es uniforme y puede ser alta o baja dependiendo del área. Por ejemplo, en el caso de la exportación de sedimento (Mapa 9), se puede notar que, con la ejecución de los sistemas silvopastoriles, las áreas con mayor reducción en la

15 El 42% del rebaño bovino es ganado de carne, 26% de productos lácteos y 32% es de doble finalidad (CCAFS, 2015).

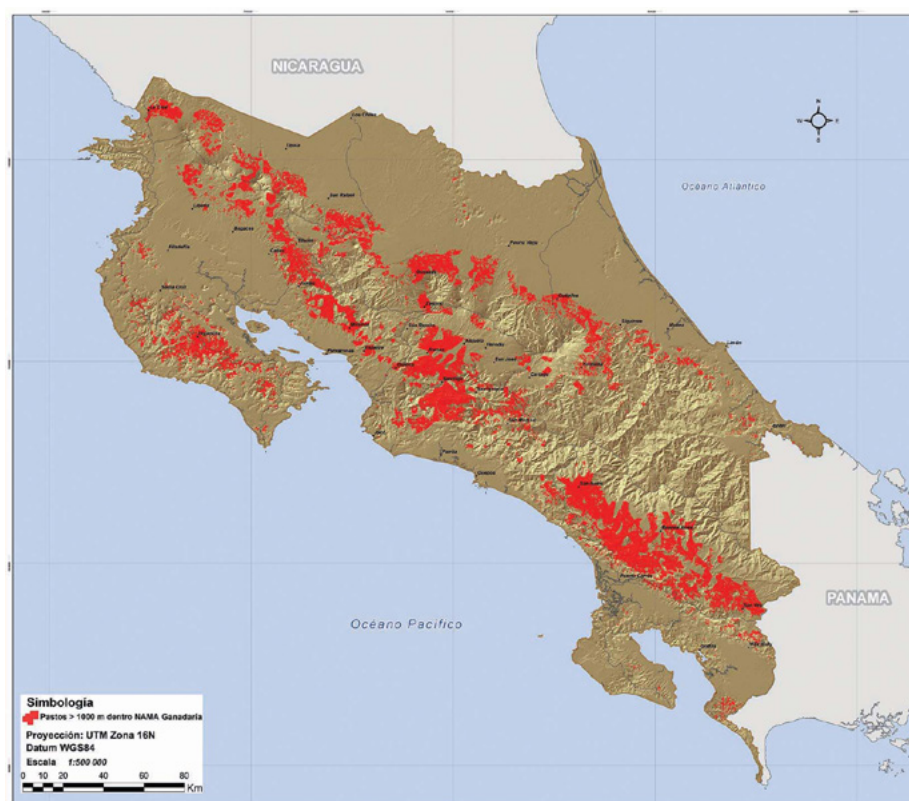
16 A través de este sistema de gestión, el rebaño se rota en secciones de pastizales cada dos o tres días. Esto permite aumentar el número de cabezas de ganado en un área determinada (MINAE, MA aG and UNDP, 2014).

exportación de sedimentos (color amarillo) tienden a ser en el oeste del país, mientras que las áreas con menor reducción tienden a estar en el este.

Con base en los mapas anteriores, se presentan los resultados de optimización de ROOT para el área meta con aplicación de sistemas silvopastoriles, en pastos de ganado lechero, ubicados en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m. Se utilizan tres tipos de mapas: a) optimización usando solo mapas de impacto potencial; es decir datos biofísicos, b) optimización usando el mapa de impacto potencial y la ubicación de los beneficiarios y c) una optimización que, de forma adicional, usa el mapa de corredores biológicos.

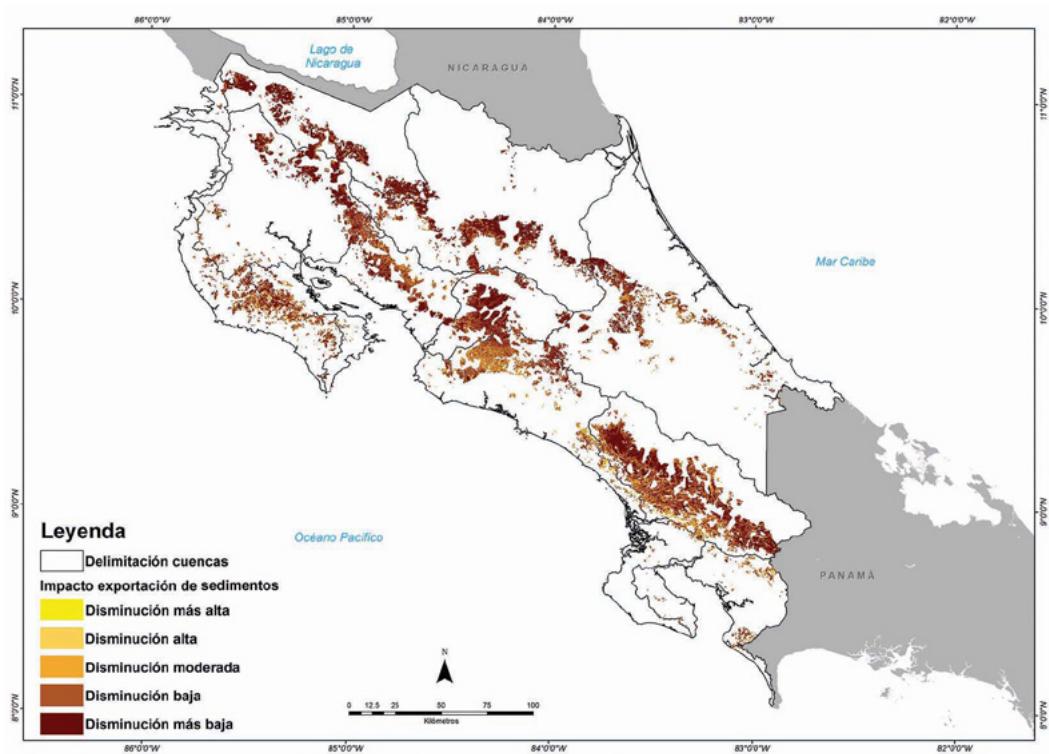
Como se puede observar a través de estos mapas, las áreas de priorización para desarrollar sistemas silvopastoriles, en pastos ubicados en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., varían

dependiendo de las variables que se apliquen. Por ejemplo, cuando solo se toma en consideración el mapa de impacto potencial (los cambios esperados después de implementar los sistemas pastoriles) (Mapa 12), las áreas prioritarias para la optimización (color verde) incluyen áreas en el sur del país. Sin embargo, cuando se corre la optimización tomando en cuenta a los beneficiarios (Mapa 13), las áreas prioritarias tienden a concentrarse en el norte y centro del país y, disminuyen de manera drástica en el sur. De la misma manera, cuando se agrega el mapa de corredores biológicos (Mapa 14), las áreas prioritarias tienden a distribuirse en el norte y este del país e, incluso, áreas prioritarias son identificadas de nuevo en el sur del país. Como se explicó en la metodología (Sección 5), los mapas de resultados usan hexágonos de 400 ha como unidades de decisión espacial, permitiendo una toma de resoluciones a esa escala.



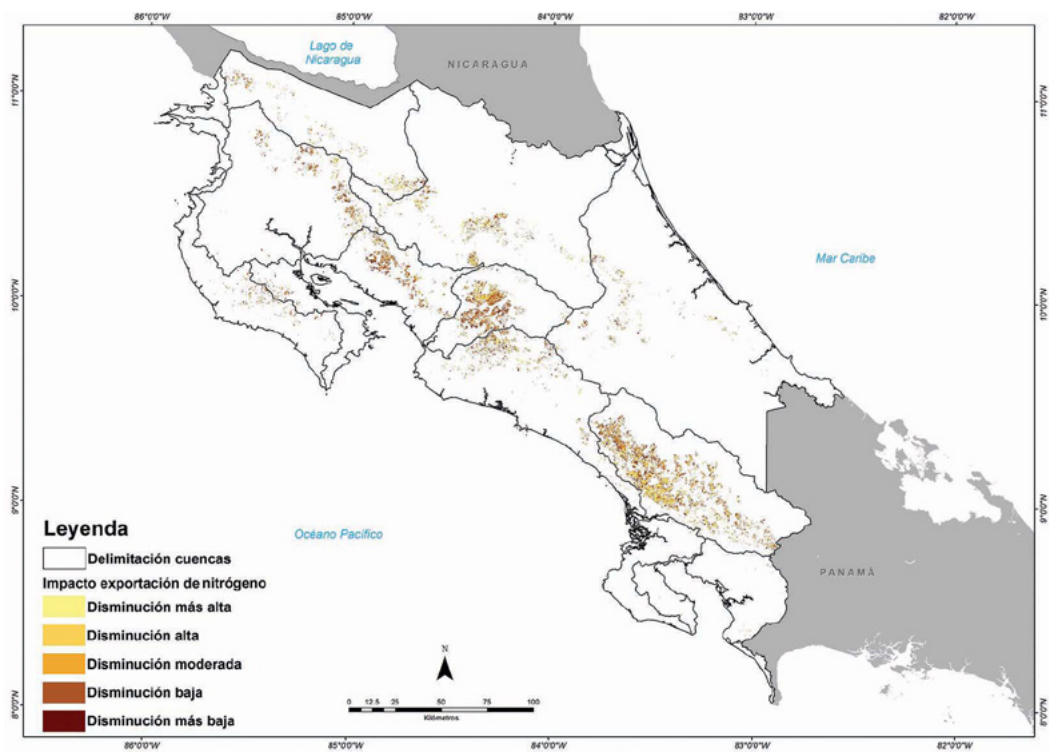
Mapa 8 Ubicación de pastos para ganado lechero dentro de la NAMA Ganadería.

Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.



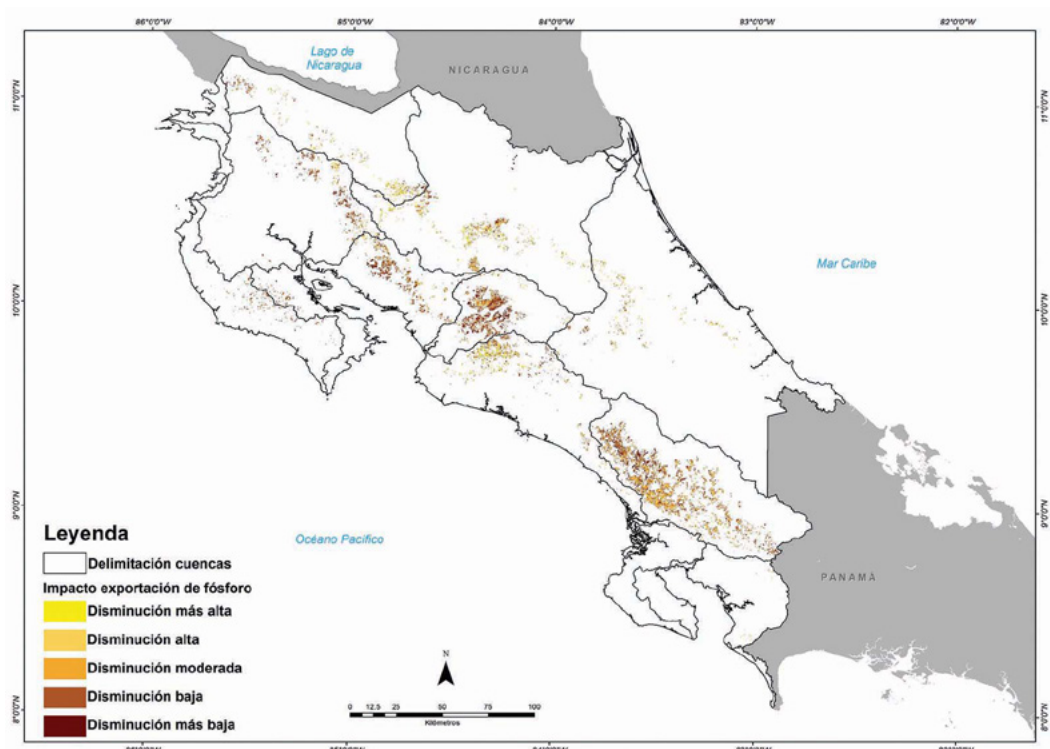
Mapa 9 Impacto en la exportación de sedimentos del sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia.



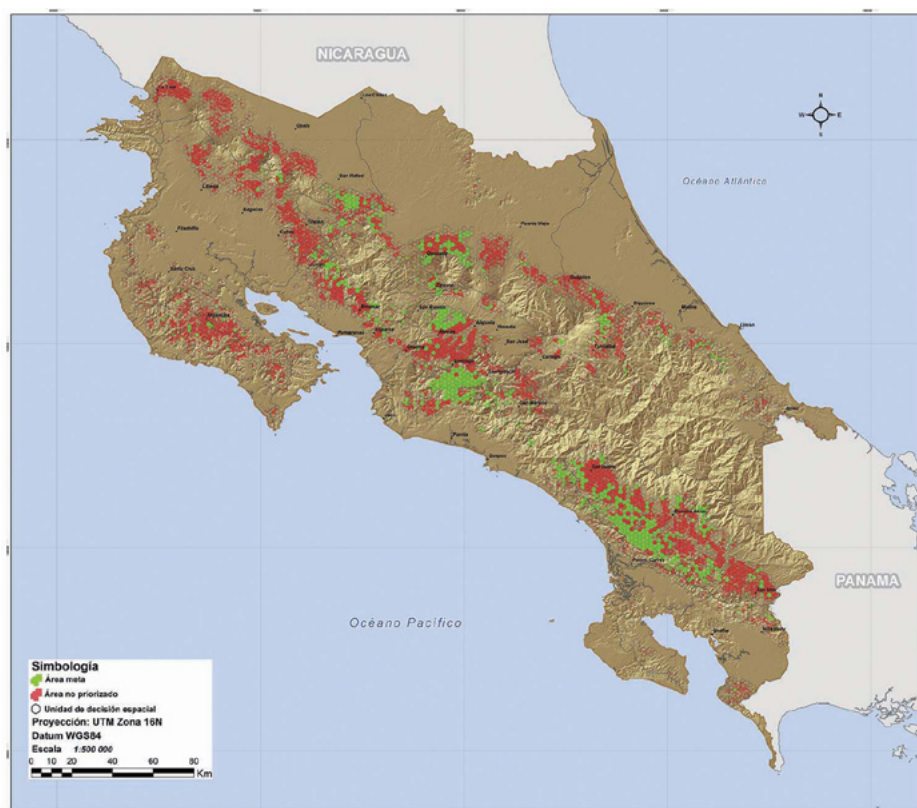
Mapa 10 Impacto en la exportación de nitrógeno del sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia



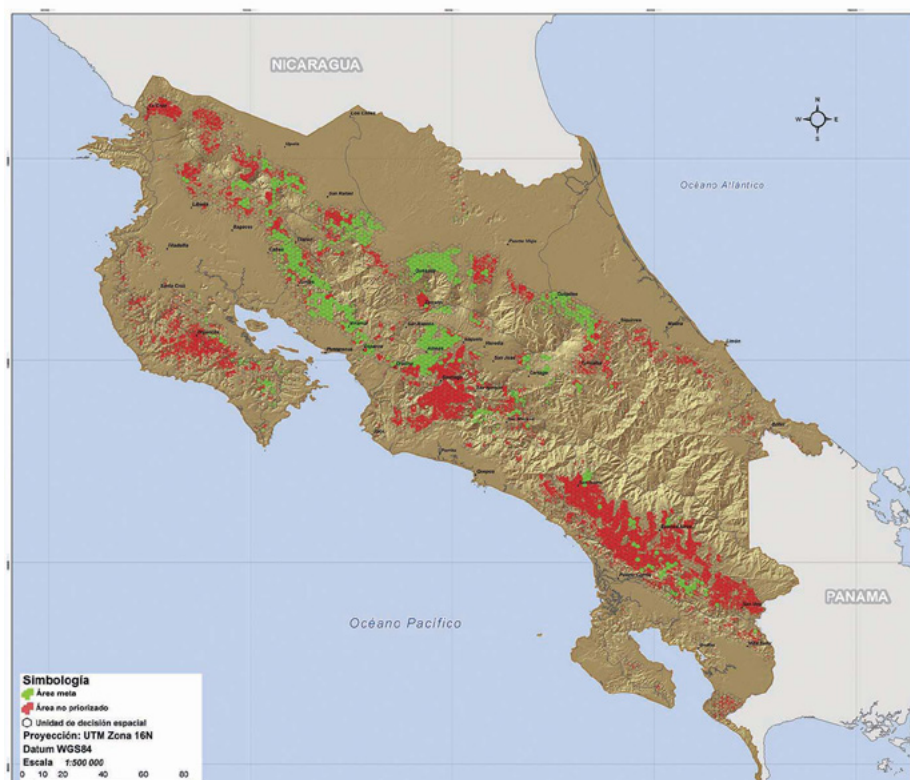
Mapa 11 Impacto en la exportación de fósforo del sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia.



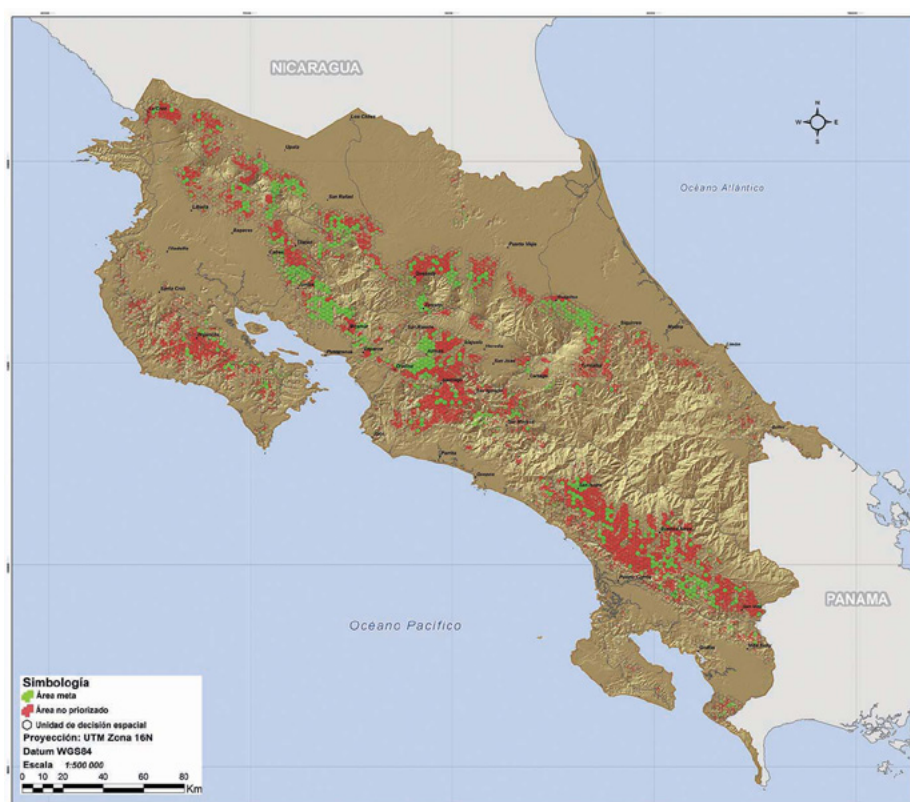
Mapa 12 Optimización de ROOT para el área meta de implementación de un sistema silvopastoril en pastos de ganado lechero ubicadas en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 13 Optimización de ROOT para el área meta de implementación de sistemas silvo-pastoriles en pastos de ganado lechero, en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



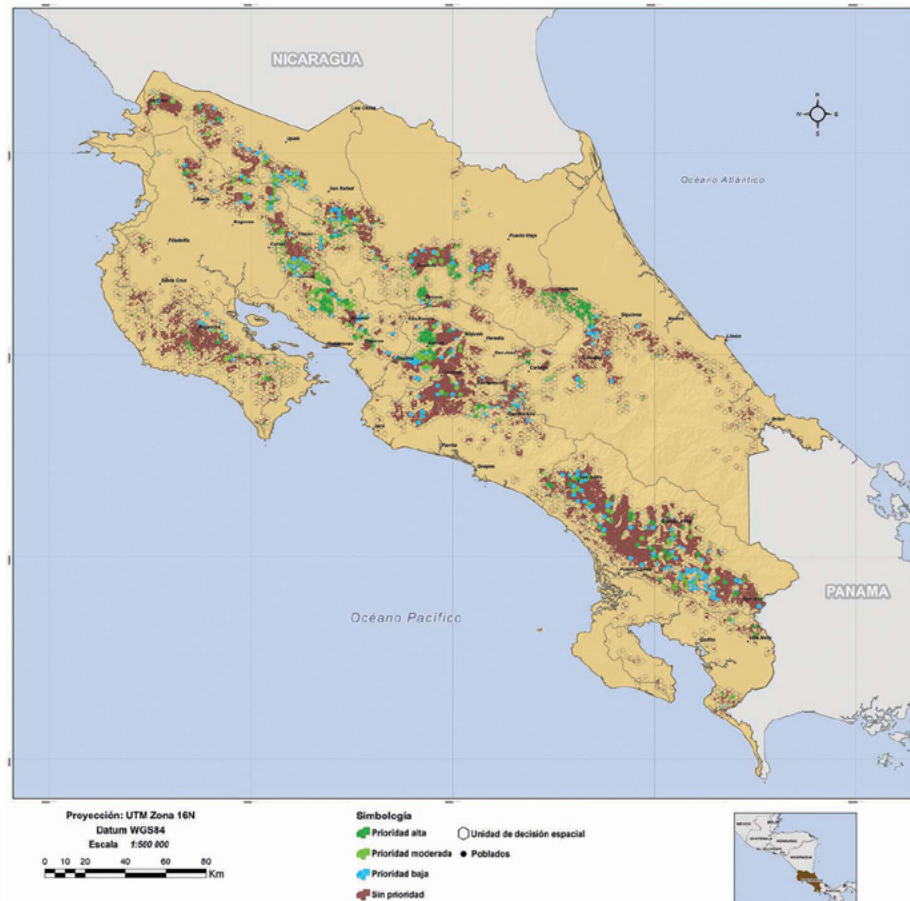
Mapa 14 Optimización de ROOT para el área meta de implementación de sistemas silvo-pastoriles en pastos de ganado lechero, en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., con mapas de impacto potencial de beneficiarios y de corredores biológicos. Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.

Hasta el momento los resultados de optimización en los mapas se basan en, si una UDE (los hexágonos de 400 ha) fue elegida (color verde) o no (color rojo) como área prioritaria para llevar a cabo los sistemas pastoriles. Sin embargo, como se mencionó en la Sección 5, las áreas prioritarias identificadas pueden ser subdivididas en diferentes niveles de prioridad para ayudar a la toma de decisiones. El Mapa 15 muestra las áreas de priorización, superiores a 1000 m.s.n.m., para la

aplicación de un sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero, subdividido en cuatro niveles de prioridad.

Las siguientes secciones muestran los resultados de los análisis de optimización para los otros programas considerados en este estudio. Para una interpretación general de los resultados referirse a la explicación descrita en esta sección.



Mapa 15 Áreas de priorización para la implementación de un sistema silvopastoril en pastos para ganado lechero en altitudes mayores a 1000 m.s.n.m. Simbología según Figura 3.

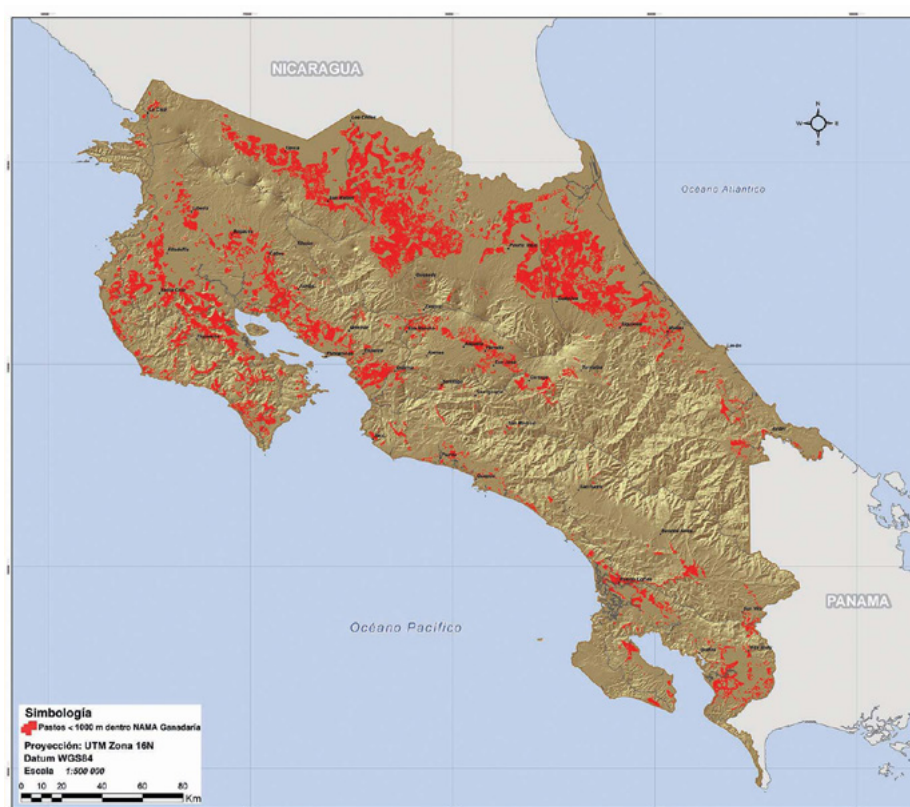
Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Sistema silvopastoril en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud agrícola dentro de la NAMA Ganadería

El Mapa 16 muestra donde se ubican los pastos para **ganado de carne** aptos para uso agrícola, ubicados a menos de 1000 m.s.n.m. Además de las medidas mencionadas previamente para el análisis de la implementación del sistema silvopastoril para ganado de carne y de doble propósito¹⁷, se incluye la mejora de las pasturas y el aumento de la densidad animal (MINAE, MAG y UNDP, 2014). En otras palabras, una mejora de pasto y un incremento en la densidad animal aumentaría los ingresos de la ganadería para carne, pero el incremento en la carga animal podría incrementar la exportación de nitrógeno y fósforo (véase Mapa 18 y Mapa 19). Para evitar este impacto negativo la propuesta busca compensar esta exportación de nutrientes con el abandono y regeneración natural en pastos que tengan aptitud forestal.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de impacto de los sistemas silvopastoriles en la exportación de sedimentos, nitrógeno y fósforo. Como se podrá observar en los mapas 17, 18, y 19, a diferencia de la sección anterior, no siempre se logran disminuciones en la exportación de contaminantes a las fuentes de agua. Por un lado, los sistemas silvopastoriles logran disminuciones en la exportación de sedimentos, pero por otro, crean incrementos en la exportación de nitrógeno y fósforo. Los siguientes mapas muestran los resultados del análisis de optimización usando solo los mapas de impacto potencial, luego se agregan los mapas de beneficiarios, y después, los mapas de corredores biológicos.

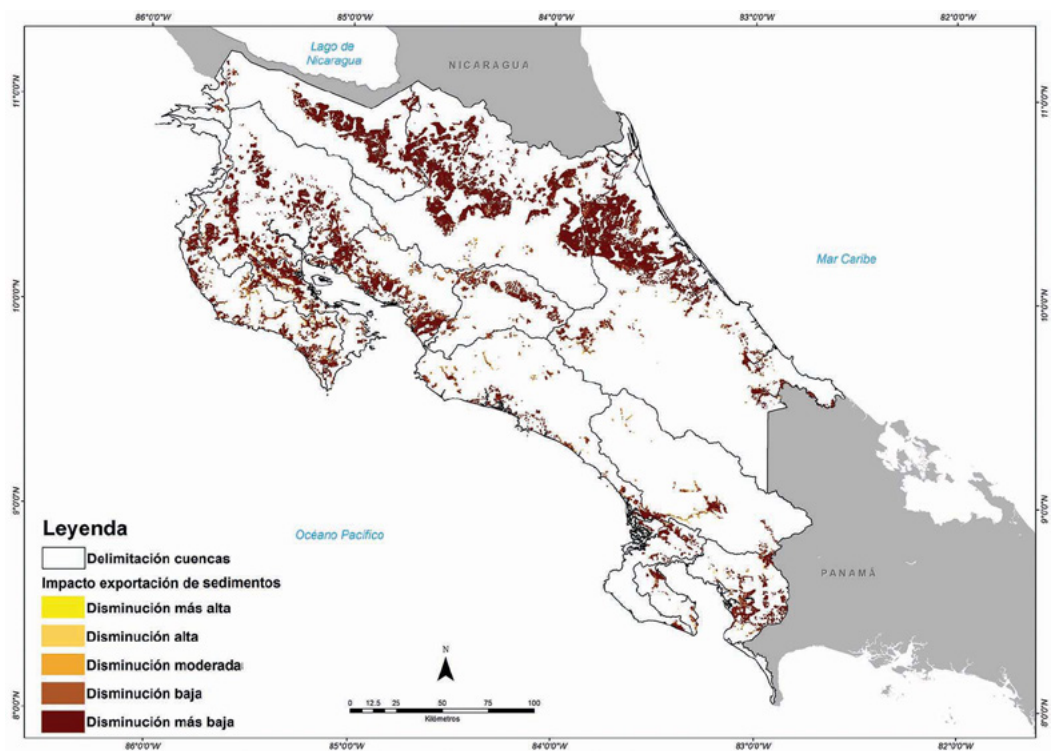
Para una interpretación general de estos resultados, referirse a la Sección 6.1.1 como ejemplo.



Mapa 16 Ubicación de pastos para ganado de carne con aptitud agrícola, dentro del NAMA Ganadería.

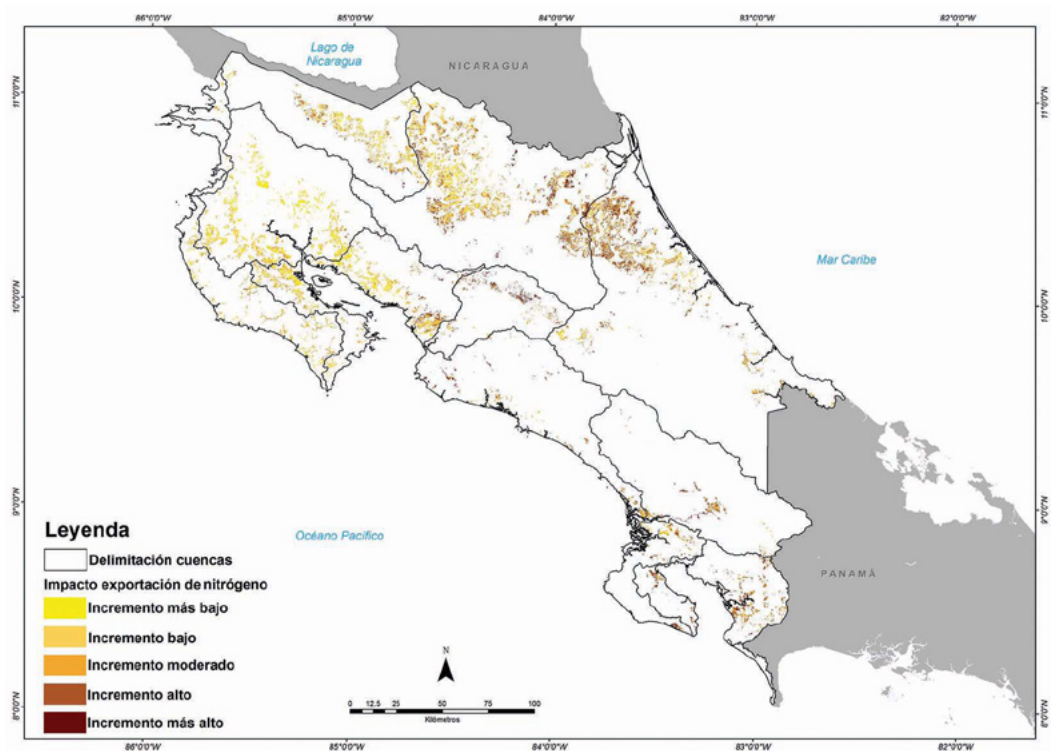
Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.

¹⁷ Como una simplificación para este análisis a escala nacional, con base en su ubicación en general, se considera que todos los pastos ubicados a más de 1000 m de altura se utilizan para la producción lechera. En general, los pastos para el ganado lechero ya están mejorados y tienen una densidad animal superior al promedio nacional con alrededor de 1 cabeza de ganado por hectárea (CCAFS, 2015; MAG, 2015b).



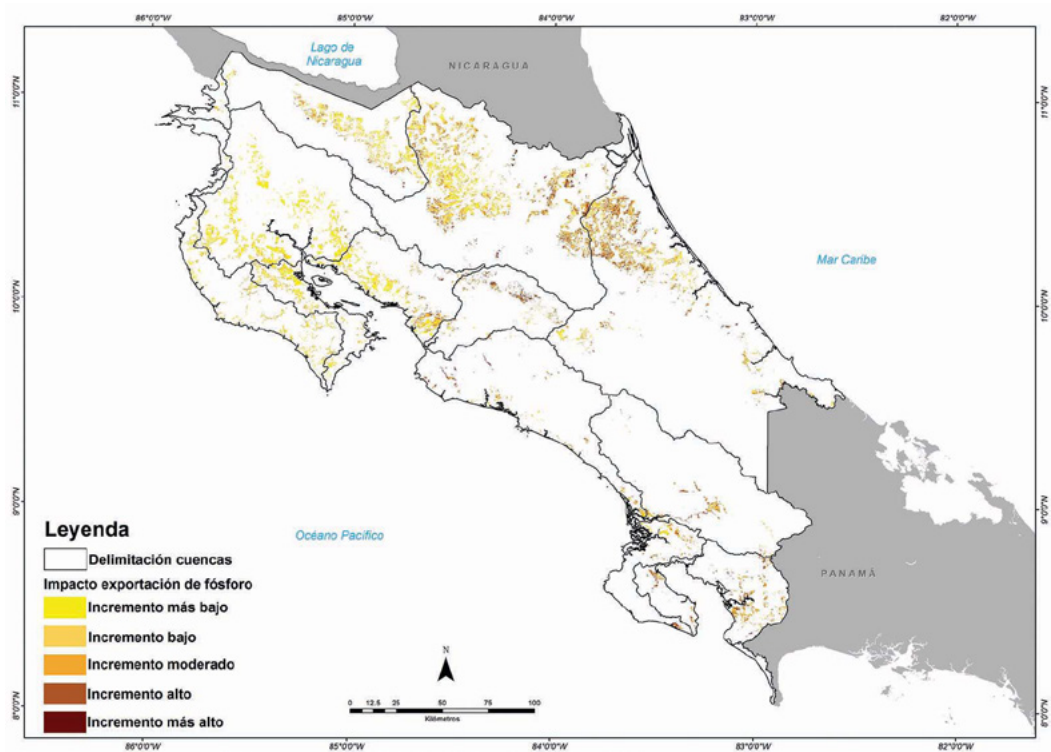
Mapa 17 Impacto de la exportación de sedimentos de los sistemas silvopastoriles en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud agrícola (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 18 Impacto en la exportación de nitrógeno de los sistemas silvopastoriles en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud agrícola (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 19 Impacto en la exportación de fósforo de los sistemas silvopastoriles en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud agrícola (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 20 Optimización de ROOT en el área meta para la implementación de un sistema silvopastoril y mejoramiento de pastos en pastizales con aptitud agrícola, a menos de 1000 m.s.n.m., utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



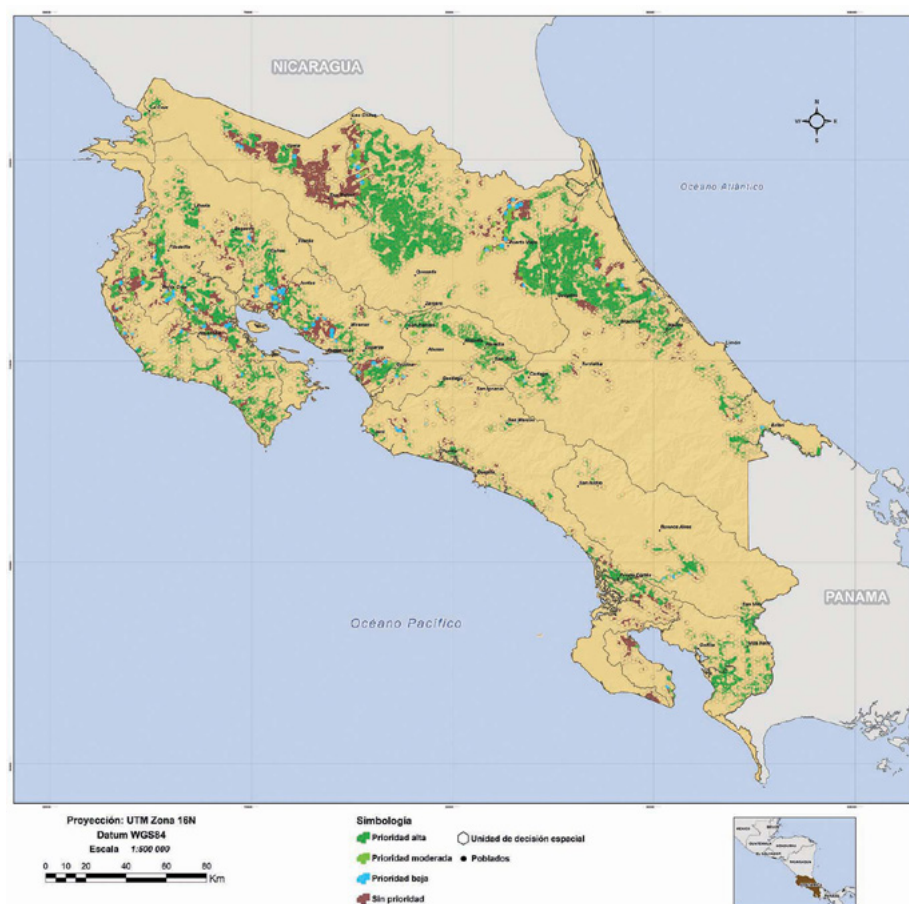
Mapa 21 Optimización de ROOT en el área meta para la implementación de un sistema silvopastoril y mejoramiento de pastos en pastizales con aptitud agrícola, a una altura menor a 1000 m.s.n.m., utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 22 Optimización de ROOT en el área meta para la implementación de un sistema silvopastoril y mejoramiento de pastos en pastizales con aptitud agrícola, a menos de 1000 m.s.n.m., utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 23 Áreas de priorización para la implementación de un sistema silvopastoril y mejoramiento de pastos en pastizales con aptitud agrícola, a menos de 1000 m.s.n.m. Simbología según Figura 3.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 Regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal dentro de la NAMA Ganadería

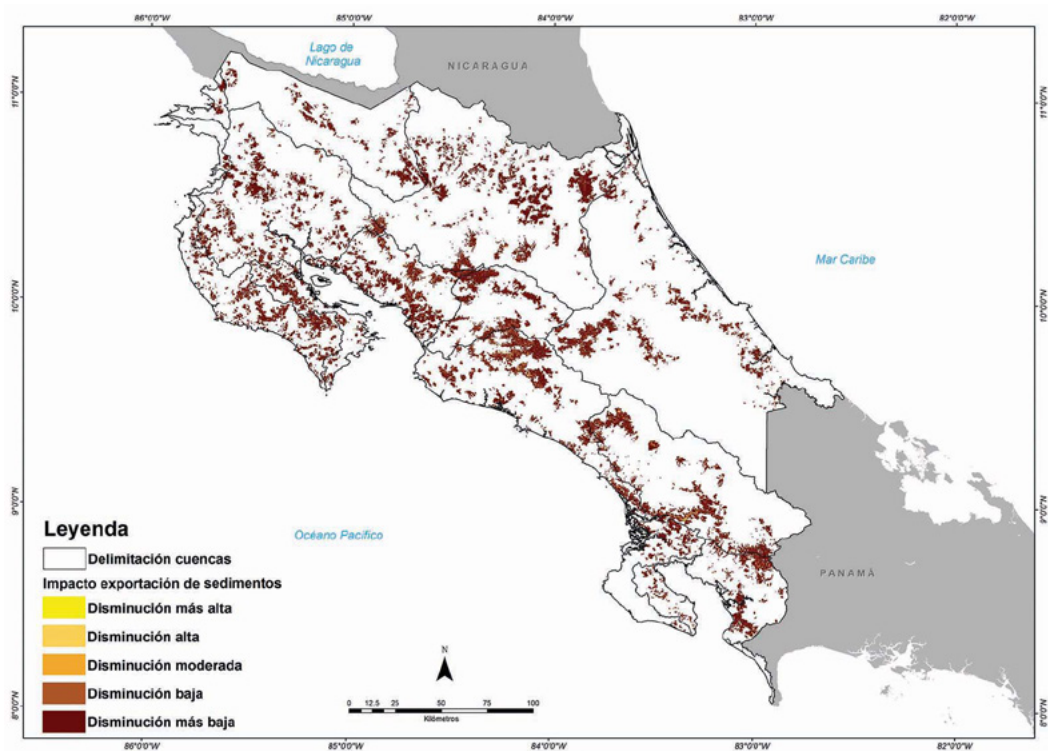
En los últimos años en Costa Rica se han abandonado los pastos menos productivos para la regeneración natural (World Bank, CIAT y CATIE, 2014). Se plantea desarrollar esta acción de restauración en las áreas señaladas en el Mapa 24, que potencialmente podría ser integrada por medio del PPSA y con parte de las acciones que se ejecutan dentro de las actividades de NAMA Ganadería (MINAE et al., 2014).

Como se observa en los siguientes mapas la regeneración natural de pasto permite, en forma general, disminuir el flujo de sedimentos (Mapa 25), mientras que la disminución en la exportación de nitrógeno (Mapa 26) y fósforo (Mapa 27) tiende a ser de moderada a alta. El sustancial impacto logrado en la reducción de la exportación de nutrientes se puede explicar por la disminución de la carga animal y de la aplicación de los fertilizantes asociados a esta acción de restauración. Para una interpretación general de estos y demás mapas de los resultados de optimización, referirse como ejemplo a la Sección 6.1.1.



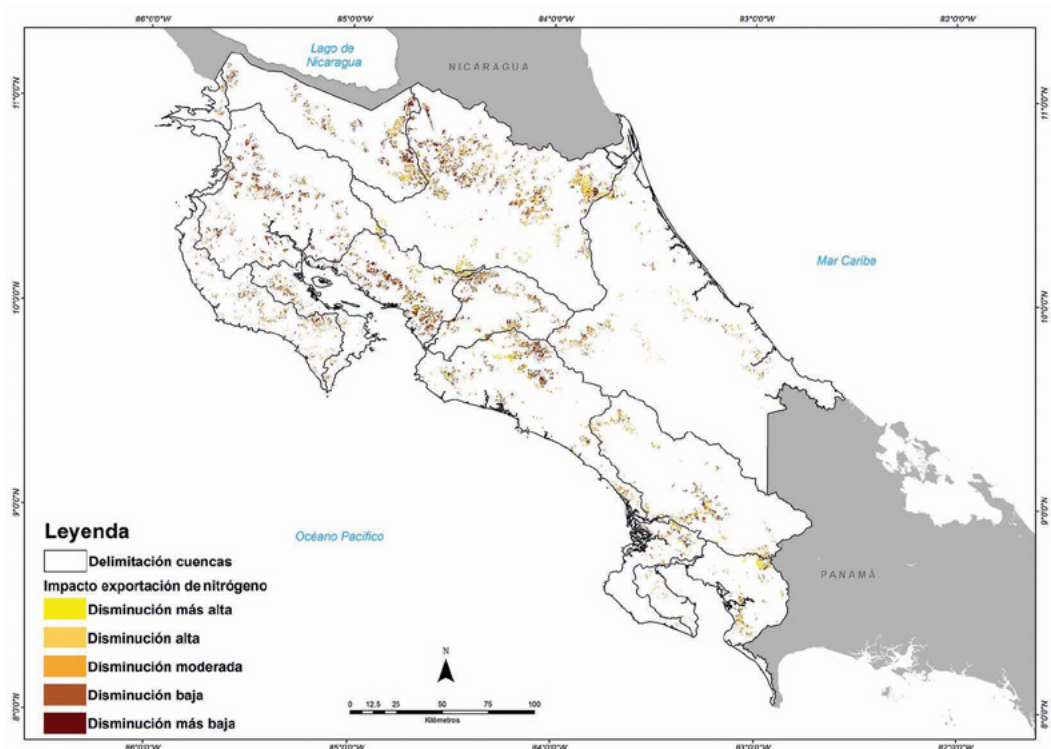
Mapa 24 Ubicación de pastos para ganado de carne con aptitud forestal dentro de la NAMA Ganadería.

Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.



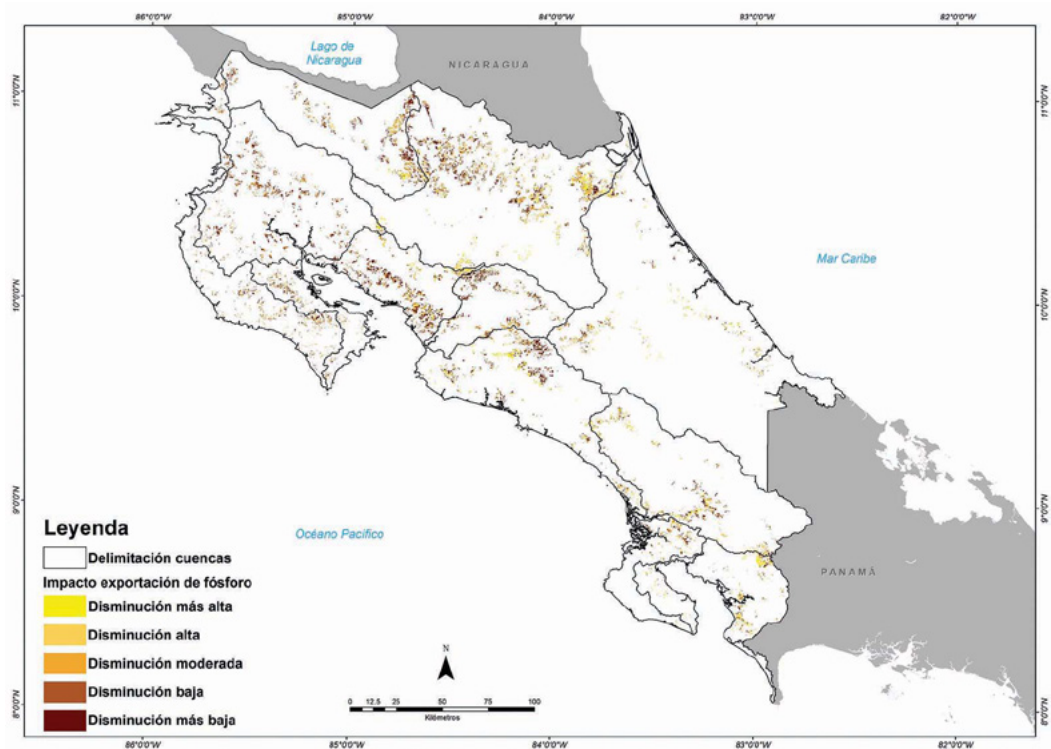
Mapa 25 Impacto en la exportación de sedimentos en zonas de regeneración natural de pastos con aptitud forestal a menos de 1000 m.s.n.m. (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 26 Impacto en la exportación de nitrógeno en zonas de regeneración natural en pastos con aptitud forestal a menos de 1000 m.s.n.m. (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 27 Impacto en la exportación de fósforo en zonas de regeneración natural en pastos con aptitud forestal a menos de 1000 m.s.n.m. (NAMA Ganadería).

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 28 Optimización de ROOT en el área meta para la regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



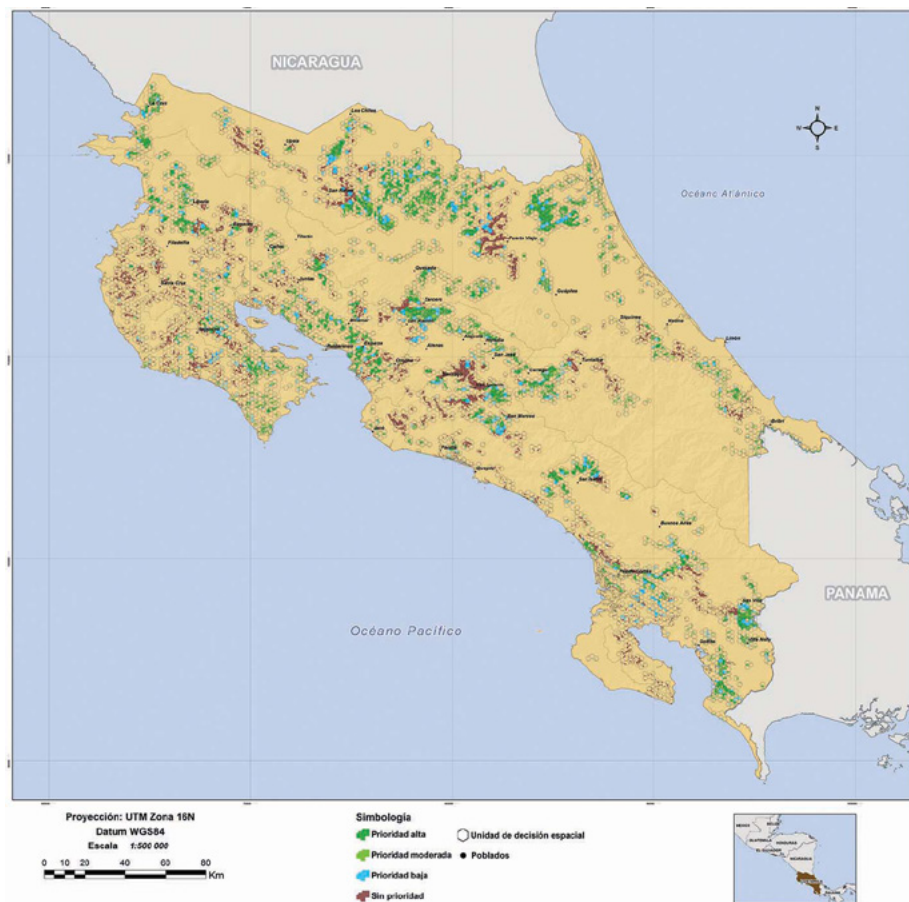
Mapa 29 Optimización ROOT área meta para la regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 30 Optimización ROOT área meta para la regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 31 Áreas de priorización para la regeneración natural en pastos a menos de 1000 m.s.n.m. con aptitud forestal. Simbología según Figura 3.

Fuente: Elaboración propia.

6.2 PPSA para pastos fuera del área de implementación de la NAMA Ganadería

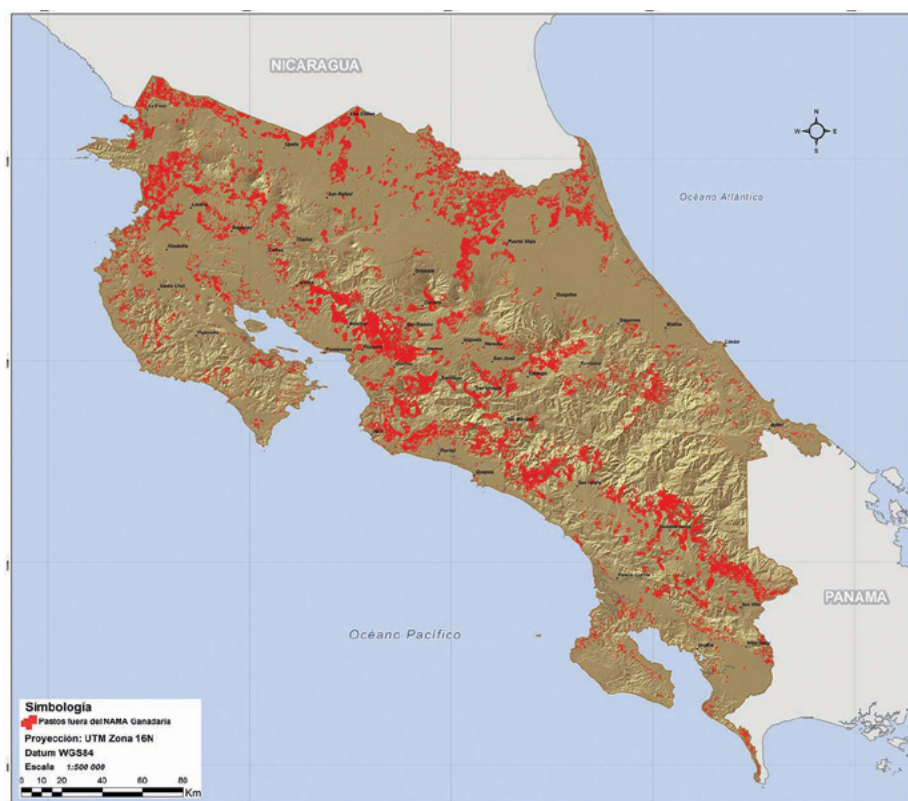
No todos los pastos se encuentran dentro de las áreas identificadas para el desarrollo de la NAMA Ganadería, existen, además, otras oportunidades para aplicar acciones que pueden contribuir con la meta de restauración a la que Costa Rica se ha comprometido en el marco del Desafío de Bonn. Aunque en el país es común abandonar los pastizales para permitir la regeneración natural, también se sustituyen por plantaciones forestales (World Bank, CIAT y CATIE, 2014). El reemplazo de pastizales con plantaciones forestales es una propuesta presentada por el Comité Técnico (2016) como una de las acciones de restauración para ser consideradas, con el fin de lograr el compromiso frente al Desafío de Bonn. Esta actividad puede ser cubierta también por el PPSA (FONAFIFO, 2014) y enfocarse en pastizales fuera del área de la NAMA Ganadería.

El Plan Nacional de Desarrollo Forestal 2001-2020 presenta como uno de sus mayores retos, pasar de una política avanzada de conservación de los recursos naturales y protección del medioambiente a un enfoque integral de sostenibilidad (MINAE, 2011). De esta manera el plan busca reforzar la unión entre la protección ambiental, el uso inteligente de los recursos naturales y el desarrollo económico, a través de varias

prácticas que incluyen: el ordenamiento de tierras forestales y su contribución al paisaje; el posicionamiento de una imagen positiva y altamente conocida del sector forestal; el aseguramiento de condiciones para la producción y consumo de servicios ambientales provenientes de ecosistemas forestales sostenibles; la facilitación de una coordinación multisectorial y, finalmente, la promoción de un manejo forestal sostenible como pieza clave, tanto para la estrategia de adaptación como para la de mitigación asociada con la carbono neutralidad.

Por un lado, el incremento del área de bosques bajo la modalidad de PPSA permitirá conservar, proteger y, a su vez, preservar los servicios ambientales que proveen, además de dar un mayor énfasis a aquellas regiones con vacíos de conservación, que mejoraría la conectividad del paisaje. Asimismo, las modalidades de reforestación con especies nativas o en vías de extinción y, reforestación en áreas de protección, permiten un enfoque en el establecimiento de estas especies y la creación de fuentes de germoplasma. Por otro lado, el fomento de las plantaciones forestales comerciales, en sitios que presentan un alto potencial productivo para el desarrollo industrial de madera, contribuye con la provisión de los servicios ambientales.

El Mapa 32 muestra las áreas de pastizales en consideración para ser reemplazadas por plantaciones forestales. Los mapas que siguen muestran los impactos de la puesta en

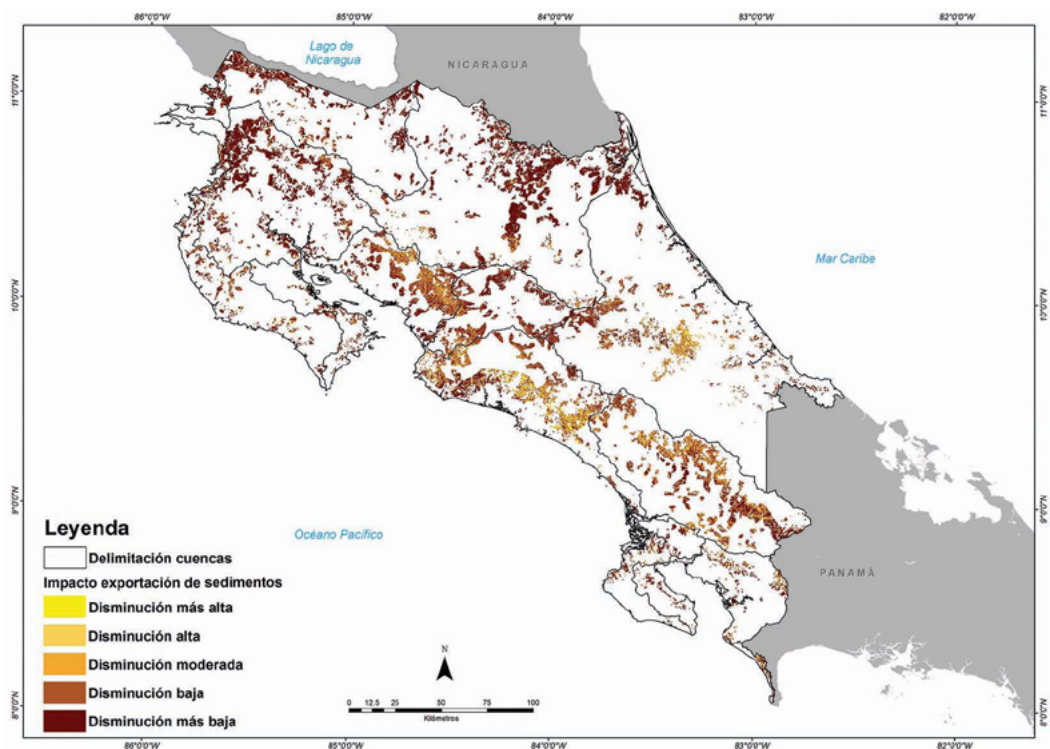


Mapa 32 Ubicación de pastos fuera del área NAMA Ganadería

Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.

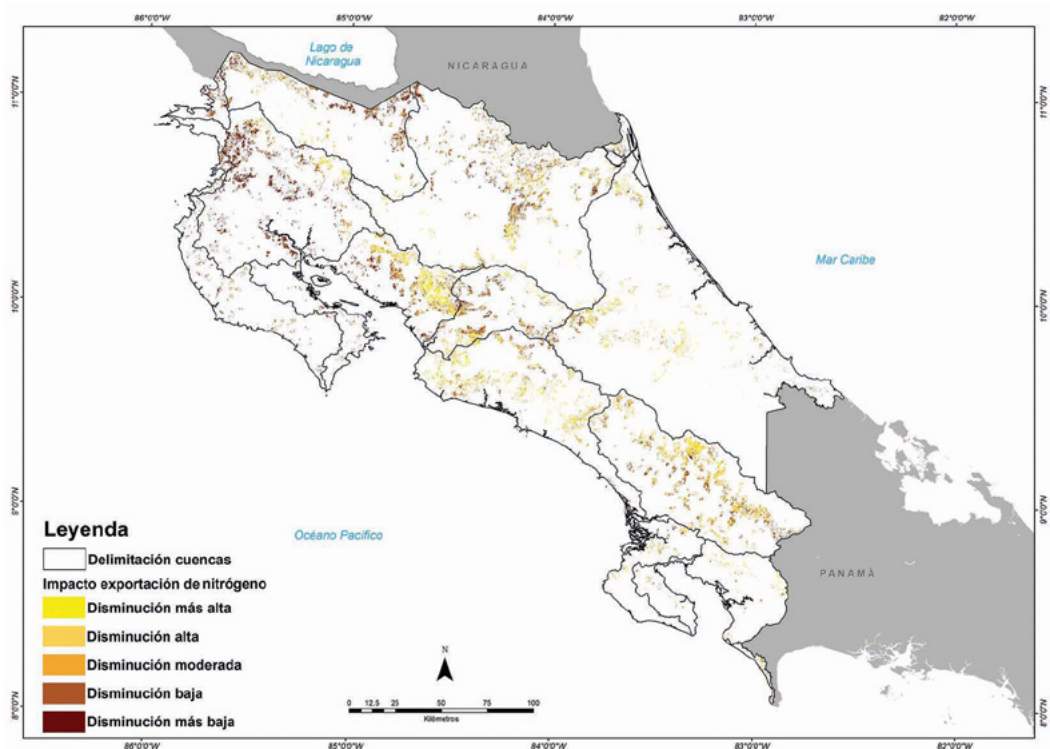
marcha de esta actividad en la exportación de sedimento, nitrógeno y fósforo, así como también, los resultados de optimización tomando en cuenta los mapas de impacto potencial,

la ubicación de los beneficiarios, agregando los corredores biológicos. Para una interpretación general referirse a la Sección 6.1.1 como ejemplo.



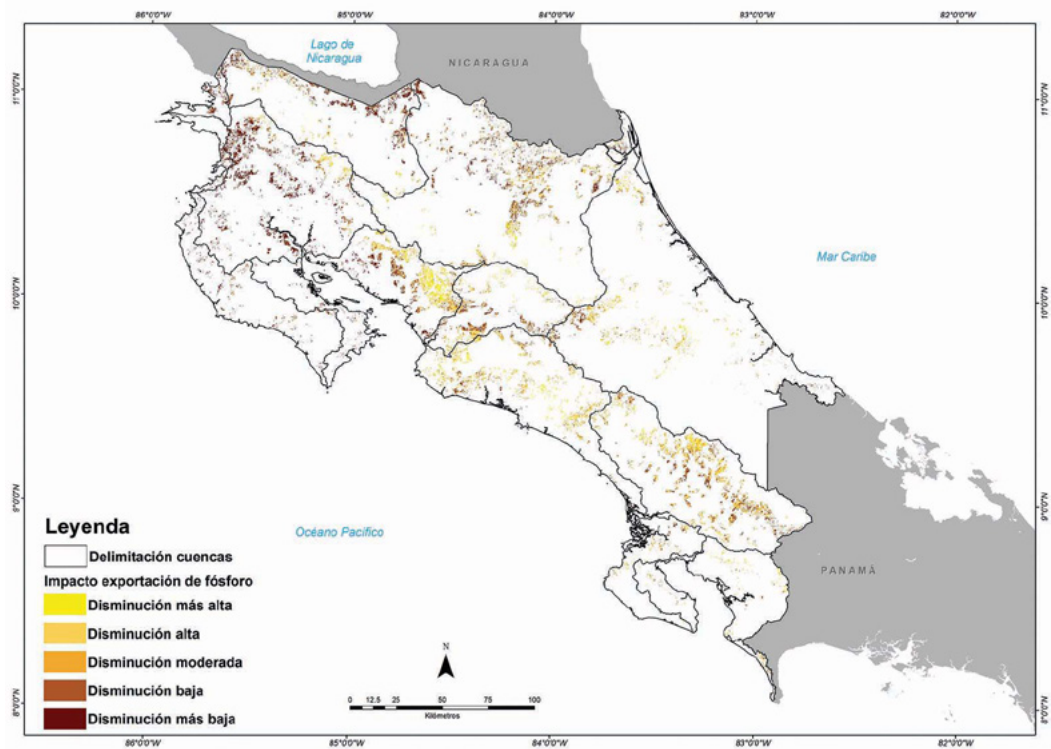
Mapa 33 Impacto en la exportación de sedimentos en zonas de implementación de plantaciones forestales, en pastos fuera del área NAMA Ganadería.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 34 Impacto en la exportación de nitrógeno en zonas de implementación de plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 35 Impacto en la exportación de fósforo en zonas de implementación de plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería.

Fuente: Elaboración propia.



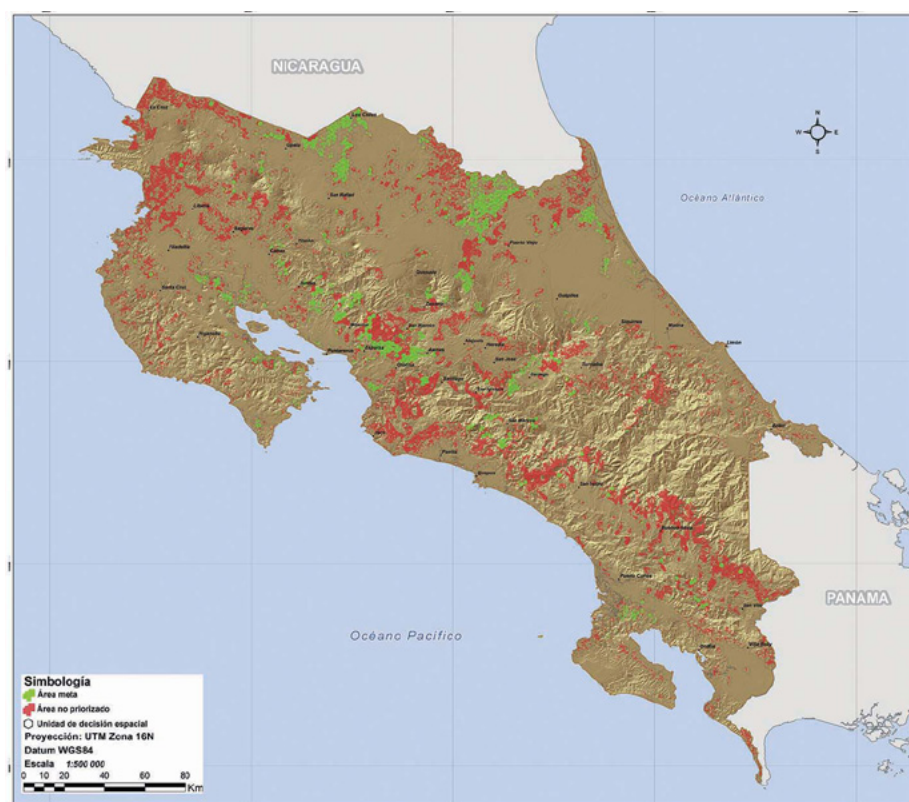
Mapa 36 Optimización de ROOT en el área meta para plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



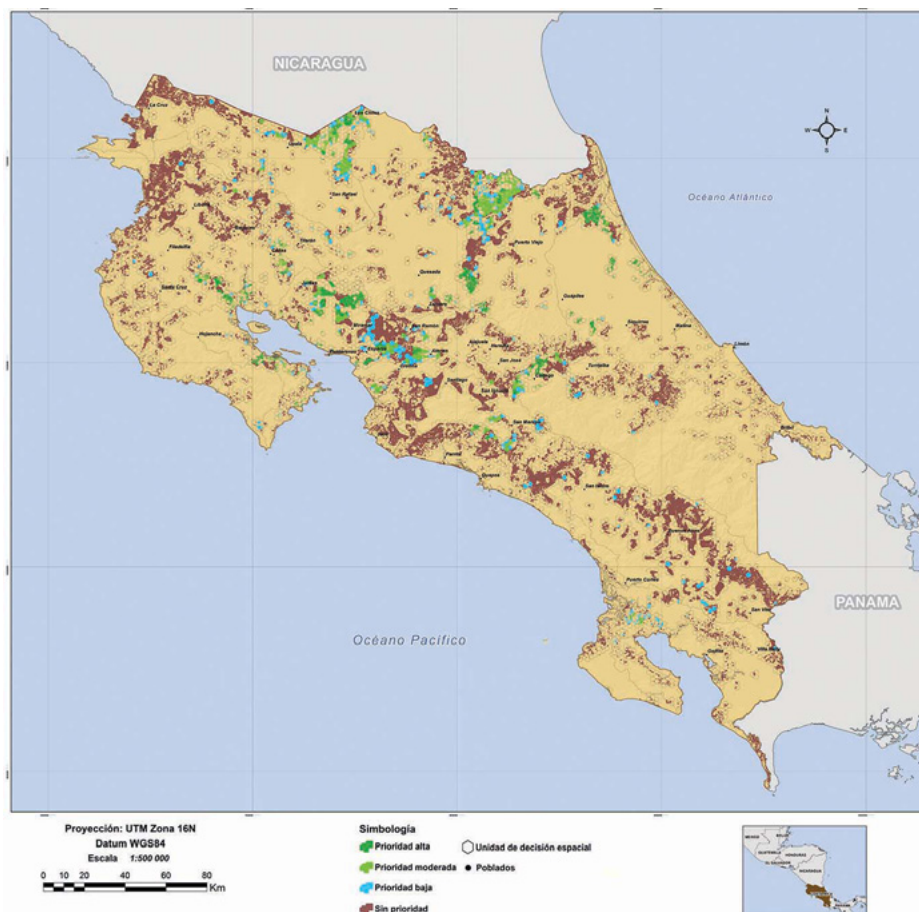
Mapa 37 Optimización de ROOT en el área meta para plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 38 Optimización de ROOT área meta para plantaciones forestales en pastos fuera del área NAMA Ganadería, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 39 Áreas de priorización para plantaciones forestales en pastos ubicados fuera del área de NAMA Ganadería. Simbología según Figura 3.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 NAMA Café

En Costa Rica alrededor del 25% de las emisiones del sector agropecuario son producto de las actividades del sector cafetalero. Muchos productores siguen aplicando planes de fertilización nitrogenada con dosis o tiempos incorrectos¹⁸. Para contrarrestar este problema, la implementación de la NAMA Café se inició en 2013 y se piensa desarrollar durante un período de 10 años (Fundecooperación e Icafé, 2013), con el objetivo de producir y procesar el café de manera sostenible y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (Nieters et al., 2016). Se espera generar una serie de cobeneficios sociales, económicos y ambientales que favorezcan la adaptación de los sistemas productivos al cambio climático.

Las medidas centrales promovidas por la NAMA Café y, consideradas en la evaluación ROAM, son por una parte, la reducción de las emisiones de nitrógeno mediante la disminución en la aplicación y, uso más eficiente de fertilizantes nitrogenados por liberación lenta o controlada^{19 y 20}; por otra parte, el aumento de sumideros de carbono a través del fomento de sistemas agroforestales²¹ (Fundecooperación e Icafé, 2013; World Bank, CIAT y CATIE, 2014; Nieters et al., 2016). A continuación, se presentan los resultados del análisis de optimización para llevar a cabo estas medidas de RFPF en el sector cafetalero. Para una interpretación general de los siguientes mapas, referirse a la Sección 6.1.1, como ejemplo.

19 La gestión de fertilizantes no es estrictamente una acción de RFPF. Sin embargo, la reducción de la retención de nutrientes disminuirá el impacto negativo, que puede tener en otros ecosistemas, para reducir la degradación.

20 La gestión de fertilizantes no es estrictamente una acción RFPF. Sin embargo, la reducción de la retención de nutrientes disminuirá el impacto negativo, que puede tener en otros ecosistemas, para reducir la degradación.

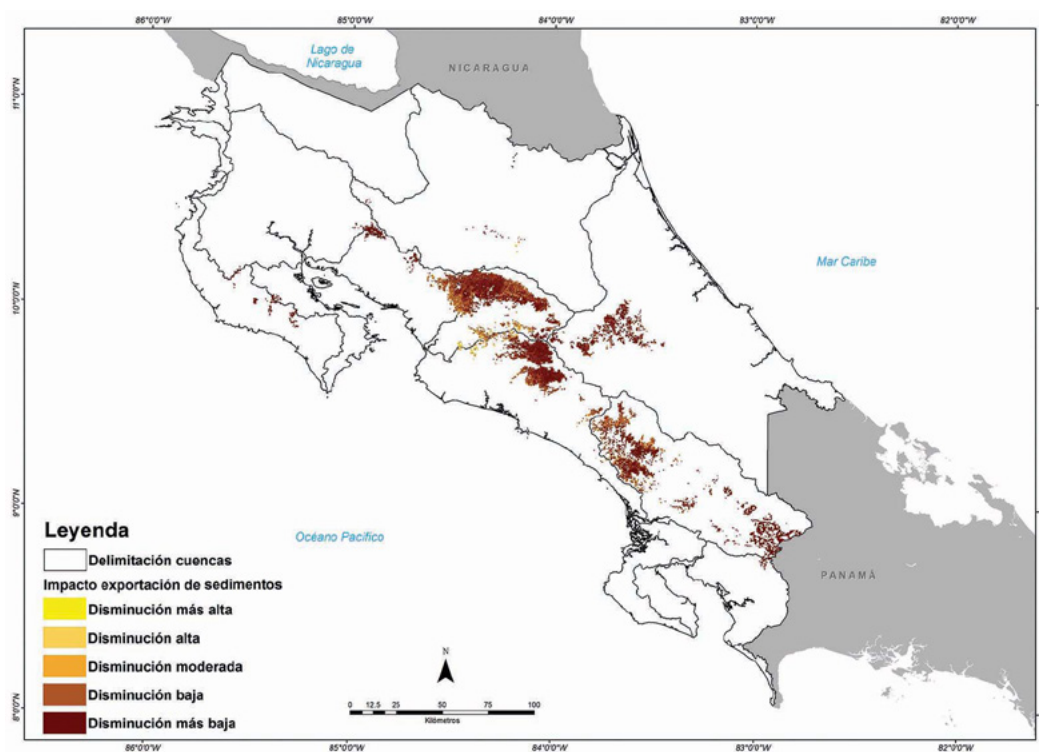
21 En Costa Rica la mayoría del café se produce bajo sombra. El impacto de la implementación de un sistema agroforestal solo se evalúa cuando el café se cultiva sin sombra (véase el Cuadro A3 del Anexo).

18 NAMA Café de Costa Rica. Disponible en: <http://www.namacafe.org/>



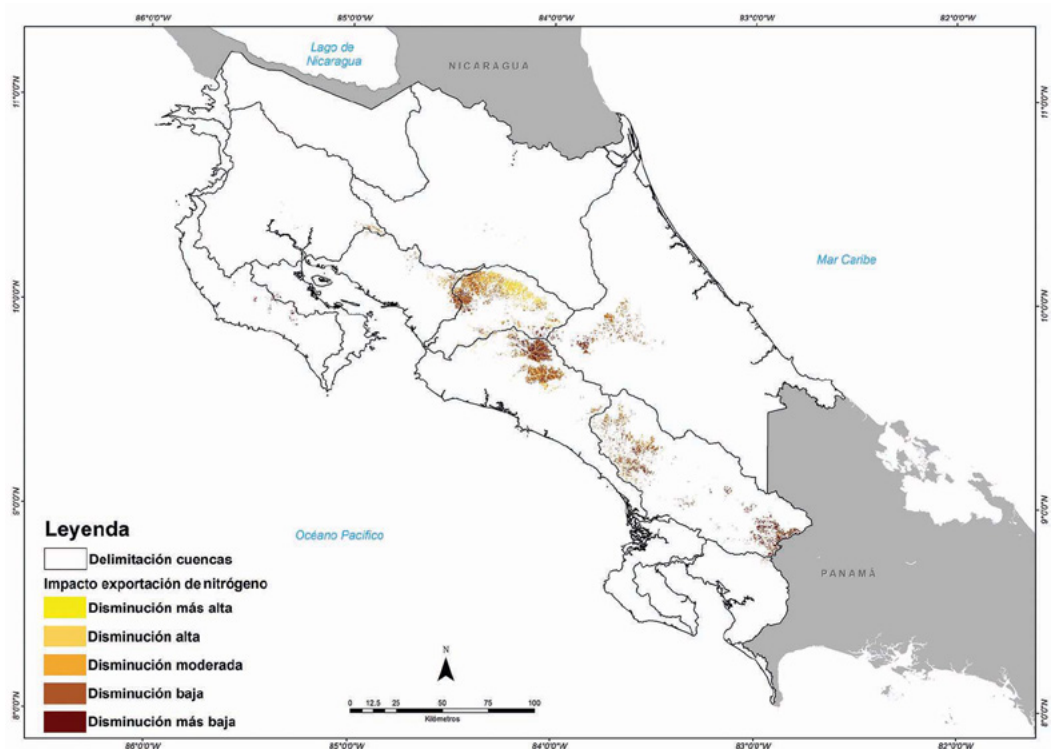
Mapa 40 Ubicación de áreas de cafetales donde aplican acciones de la NAMA Café.

Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.



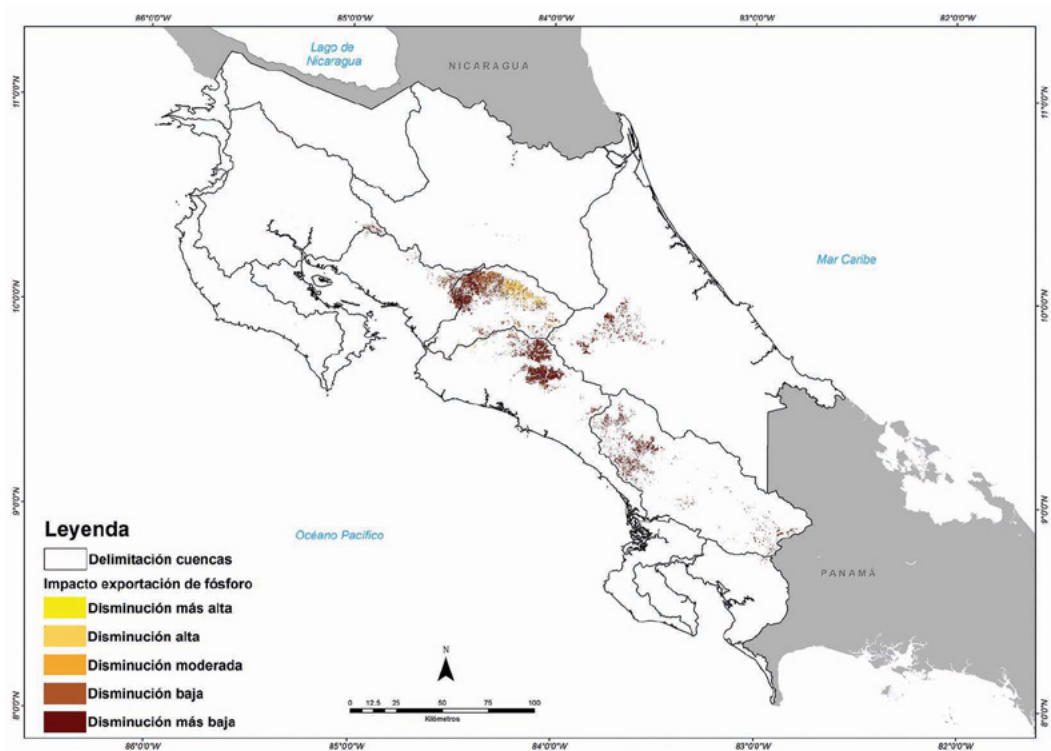
Mapa 41 Impacto en la exportación de sedimentos en zonas donde aplican acciones de la NAMA Café.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 42 Impacto en la exportación de nitrógeno en zonas donde aplican acciones de la NAMA Café.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 43 Impacto en la exportación de fósforo en zonas donde aplican acciones de la NAMA Café.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 44 Optimización de ROOT en el área meta para la NAMA Café, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



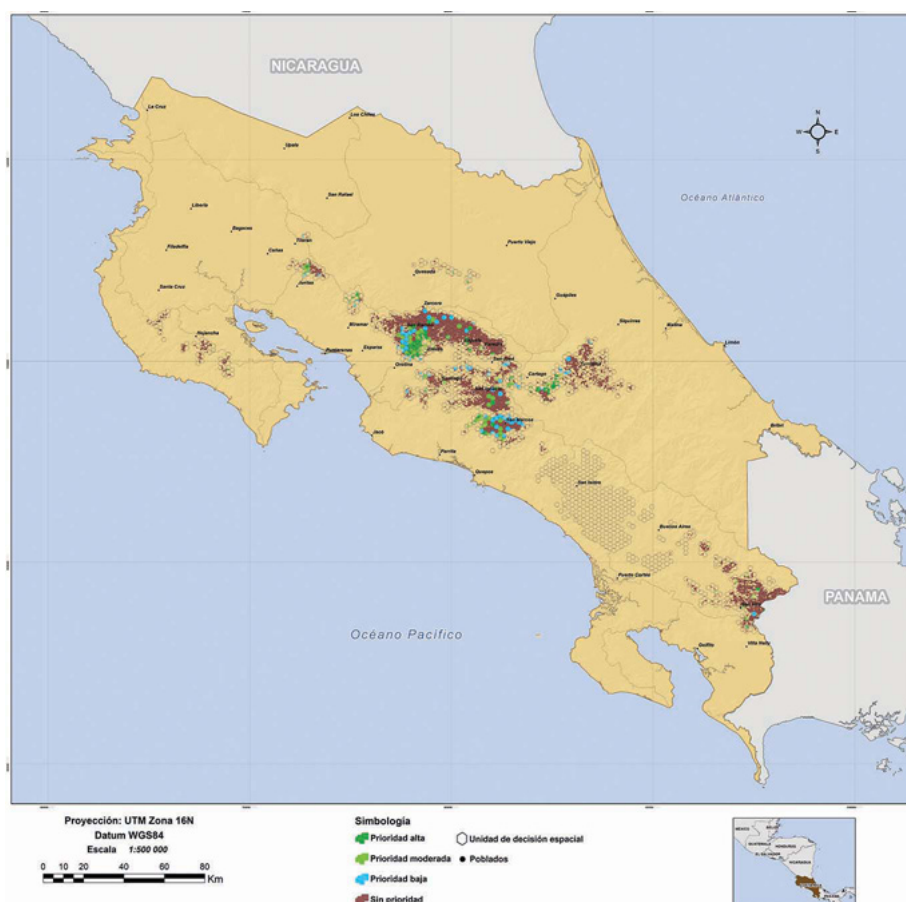
Mapa 45 Optimización de ROOT en el área meta para la NAMA Café, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 46 Optimización de ROOT en el área meta para la NAMA Café, con mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 47 Áreas de priorización para las acciones en zonas donde aplica la NAMA Café. Simbología según Figura 3.

Fuente: Elaboración propia.

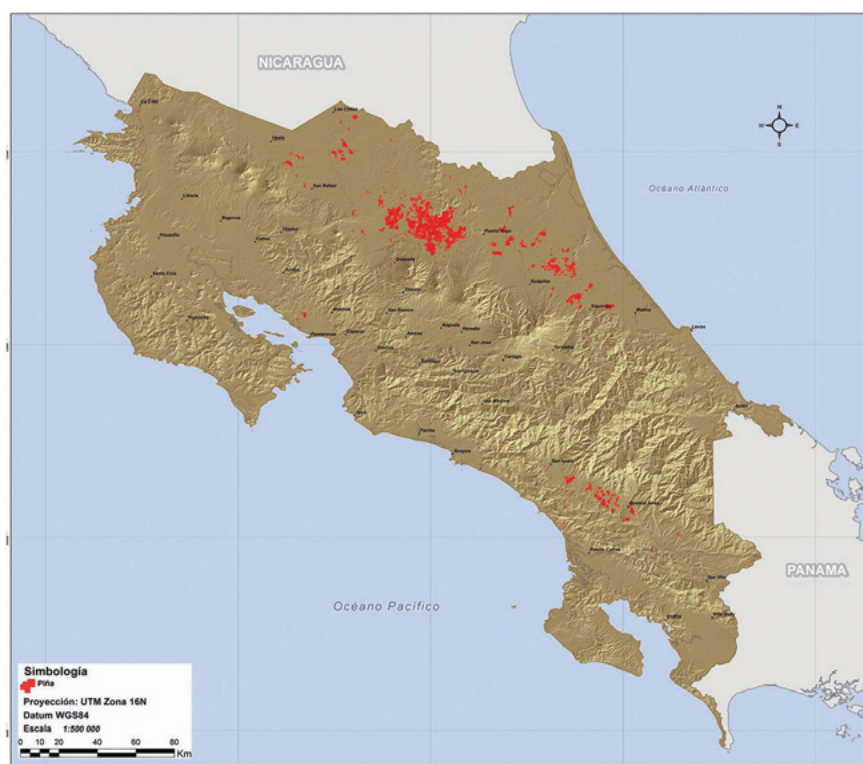
6.4 Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) para los cultivos de piña, banano y palma de aceite

Se ha mencionado la agricultura como uno de los sectores que ha provocado deforestación, degradación de tierras, pérdida de biodiversidad y un aporte negativo al cambio climático. Sin embargo, existen prácticas agrícolas que pueden contribuir a la solución de estos problemas, y permitirle a este sector ser más competitivo en los nuevos mercados, favoreciendo, a la vez, la conservación, la funcionalidad de los ecosistemas, la rentabilidad y la viabilidad social del sector. Según datos del INEC (2015), después de los pastos, los cultivos permanentes representan la segunda actividad agropecuaria de mayor extensión en Costa Rica, con más de 500.000 ha. Se trata en lo fundamental de cultivos de café, palma de aceite y banano. A pesar de que el área agropecuaria disminuyó en un 21,6%, al pasar de 3,1 a 2,4 millones de ha en los últimos 20 años, algunas actividades incrementaron sus áreas productivas alrededor de un 15%, como es el caso de la piña. La agricultura costarricense se ha caracterizado en los últimos años por especializarse en productos no tradicionales, pero con un mayor valor agregado. Se ha requerido entonces un alto nivel de tecnificación, y la tendencia a depender del uso de agroquímicos. Por ello, este sector enfrenta importantes retos en materia de adaptación y mitigación al cambio climático (PEN, 2015). En el país, la aplicación de fertilizantes, asociados a estos cultivos, representa una de las fuentes de emisión de nitrógeno más

significativa (Veldkamp y Keller, 1997; Ronen, 2010). Para darle solución a este problema y siguiendo la Estrategia Nacional de Cambio Climático, los sectores del banano y de la piña han adoptado el objetivo de llegar a ser sectores de carbono neutral para 2021 (CORBANA y Dole, 2013; World Bank, CIAT y CATIE, 2014). Consecuentemente, se ha planteado la necesidad de adoptar una serie de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA). Según la FAO (2003) se define como BPA: las “prácticas que abordan la sostenibilidad ambiental, económica y social de los procesos en las fincas y dan como resultado productos alimenticios seguros y de calidad, así como productos agrícolas no alimenticios”. A continuación, se describen las BPA consideradas para los cultivos de la piña, banano y palma de aceite y los resultados de los análisis de optimización.

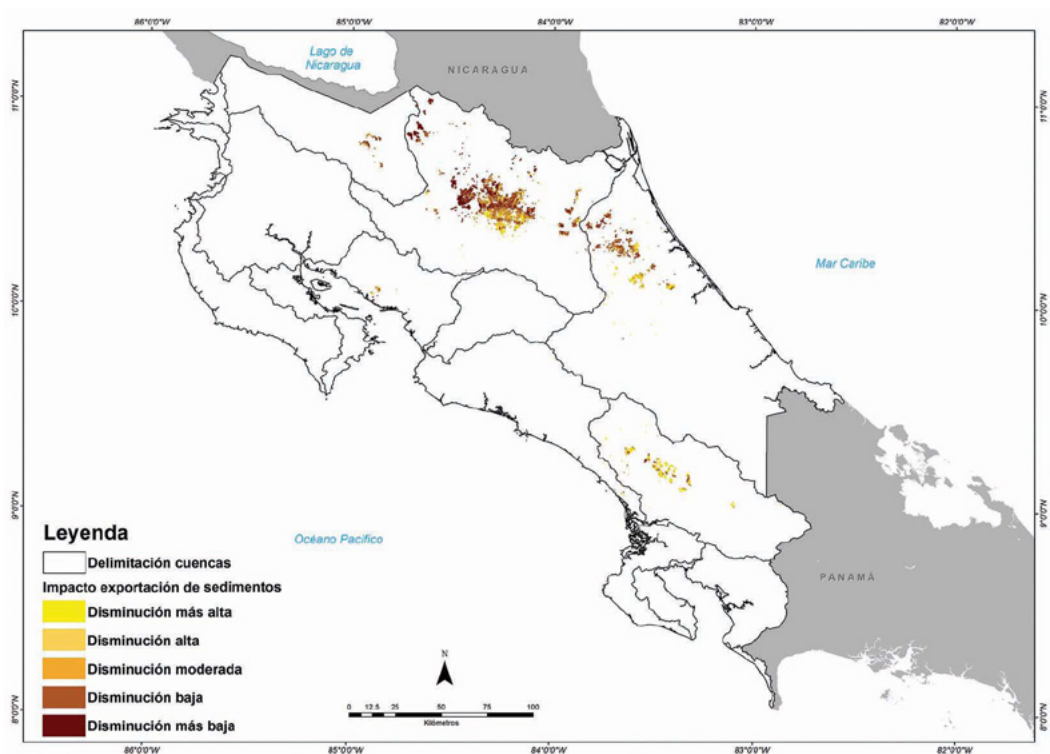
6.4.1 Buenas Prácticas Agrícolas para el cultivo de piña

Para fines de este estudio se consideraron dos buenas prácticas agrícolas en el caso de la piña: la siembra en contorno para evitar la erosión (FAO, 1996; MAG, 2010); y la reducción de fertilizantes sintéticos al enterrar una parte de los residuos de los cultivos (Quesada-Solís et al., 2005; Liu et al., 2013). A continuación se presentan los resultados de la optimización que identifican las áreas prioritarias para desarrollar buenas prácticas agrícolas en este cultivo. Para una interpretación general de los resultados referirse a la Sección 6.1.1.



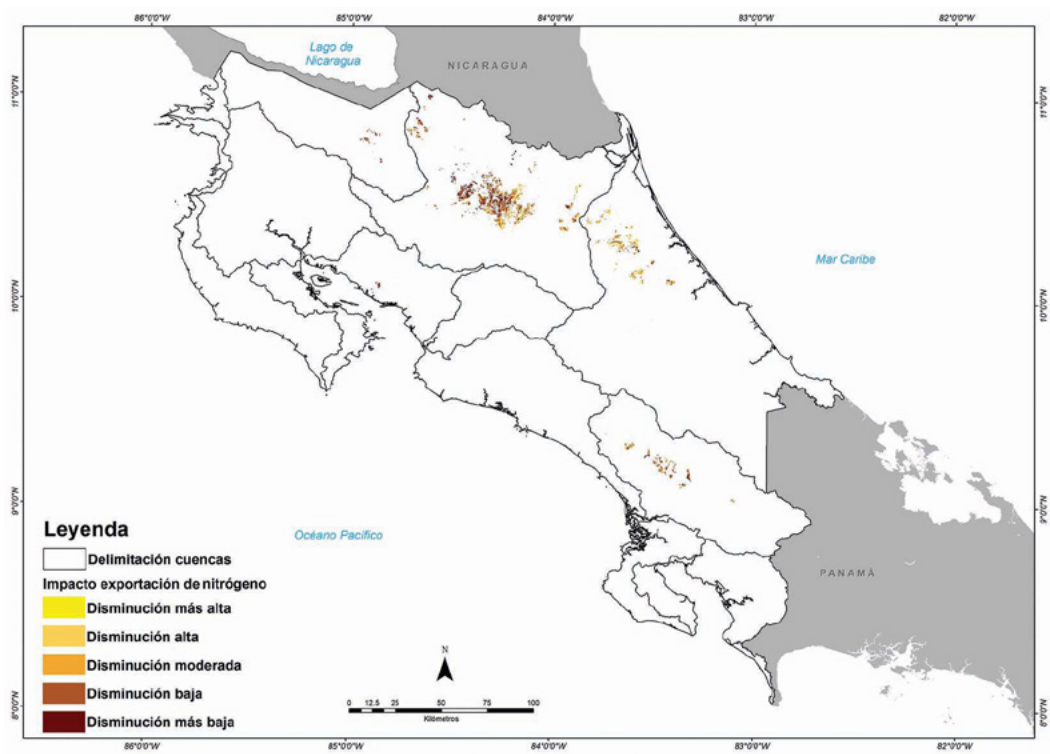
Mapa 48 Ubicación de zonas de piña.

Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.



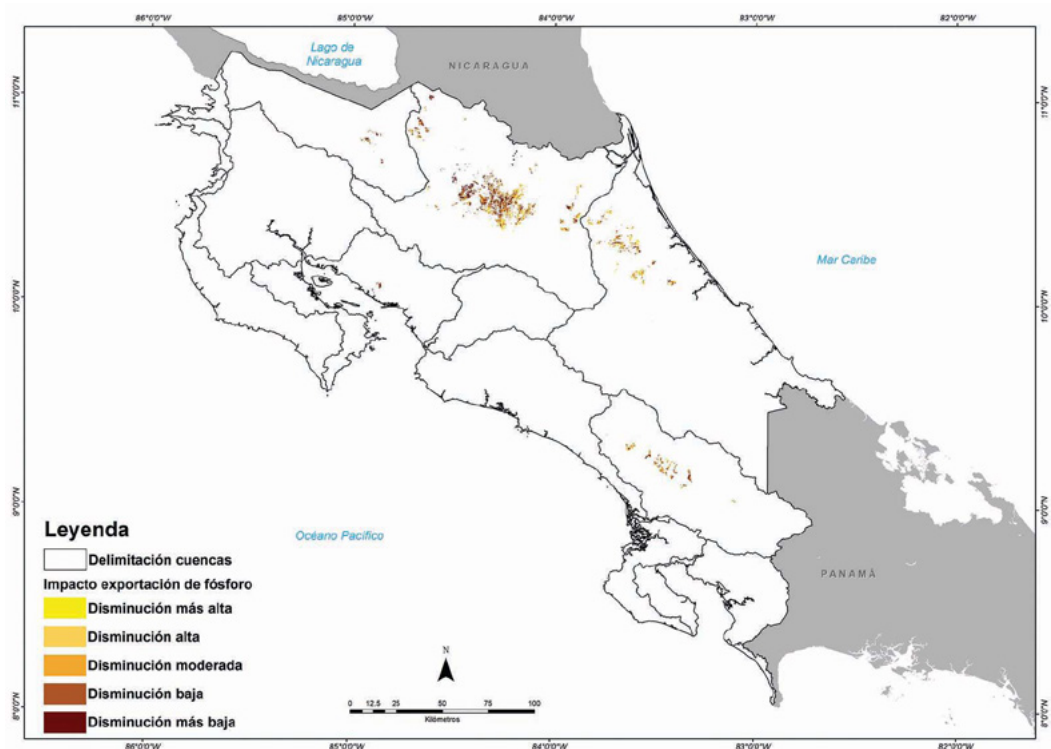
Mapa 49 Impacto de las BPA en la exportación de sedimentos en las plantaciones de piña.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 50 Impacto de las BPA en la exportación de nitrógeno en las plantaciones de piña.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 51 Impacto de las BPA en la exportación de fósforo en las plantaciones de piña.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 52 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de piña, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



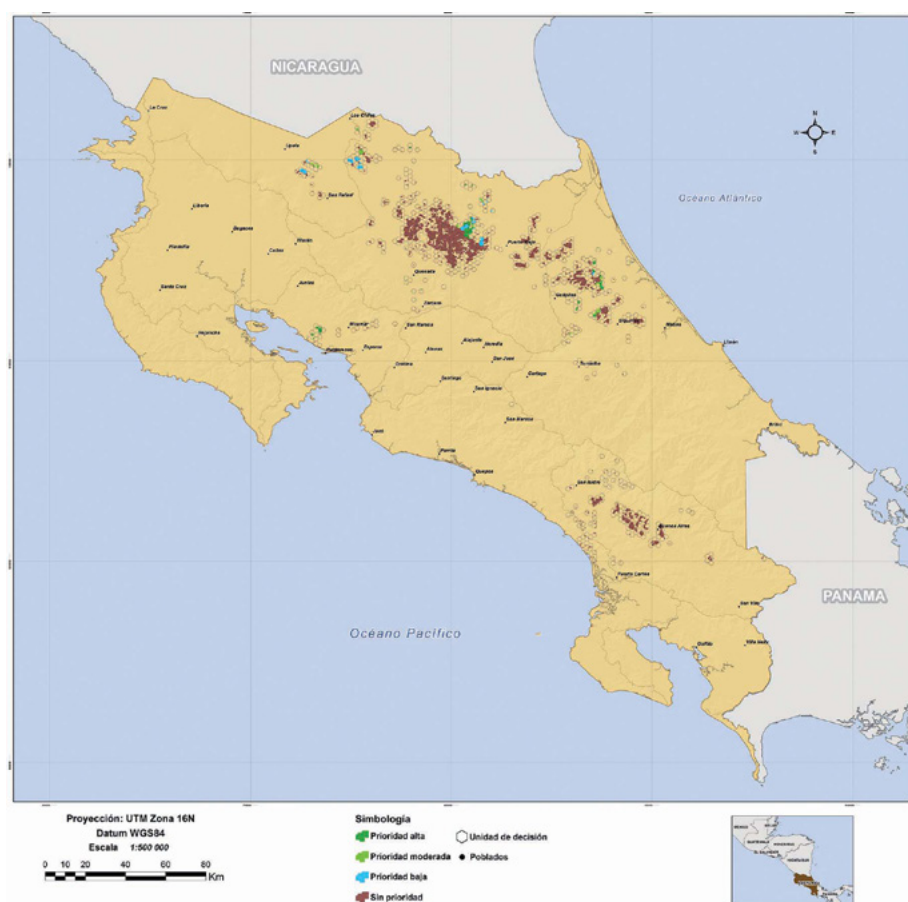
Mapa 53 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de piña, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 54 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de piña, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 55 Áreas de priorización para la implementación de las BPA en los cultivos de piña. Simbología según Figura 3.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.2 Buenas Prácticas Agrícolas para el cultivo del banano

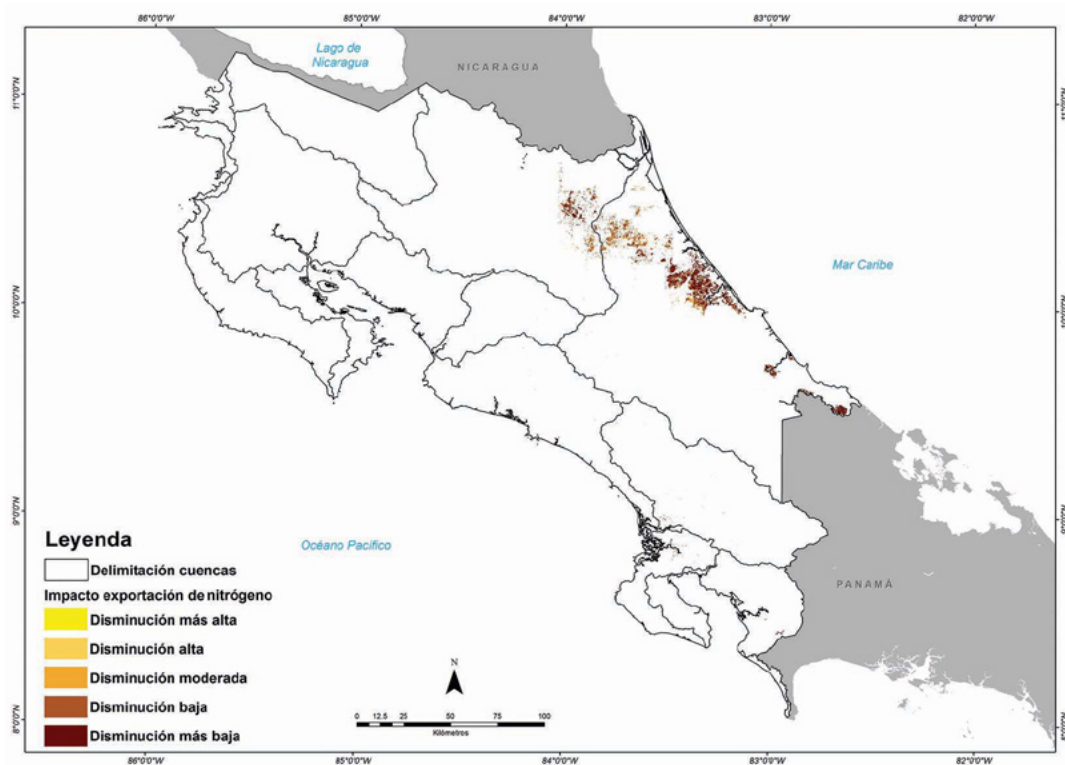
Para reducir las emisiones el sector del banano, y de forma similar a la NAMA Café, se ha propuesto una disminución en la aplicación de fertilizantes nitrogenados con el uso de fertilizantes de liberación lenta o controlada (CORBANA and

Dole, 2013). A continuación se presentan los resultados de la optimización identificando las áreas prioritarias para desarrollar esta medida. Para una interpretación general de estos resultados, referirse a la Sección 6.1.1 como ejemplo.



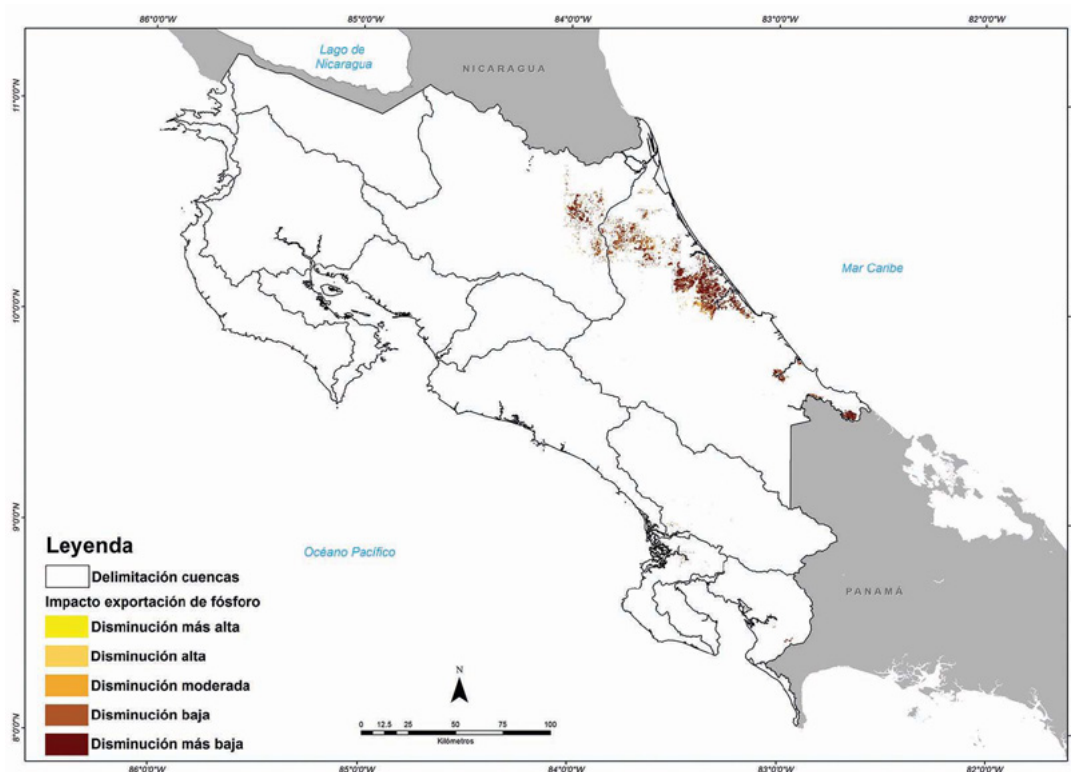
Mapa 56 Ubicación de las zonas de cultivo de banano.

Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.



Mapa 57 Impacto de la implementación de las BPA en la exportación de nitrógeno de los cultivos de banano.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 58 Impacto de implementación de las BPA en la exportación de fósforo de los cultivos de banano.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 59 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de banano, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 60 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de banano, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 61 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de las BPA en cultivos de banano, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 62 Áreas de priorización para la implementación de BPA en cultivos de banano. Simbología según Figura 3.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.3 Buenas Prácticas Agrícolas para el cultivo de la palma de aceite

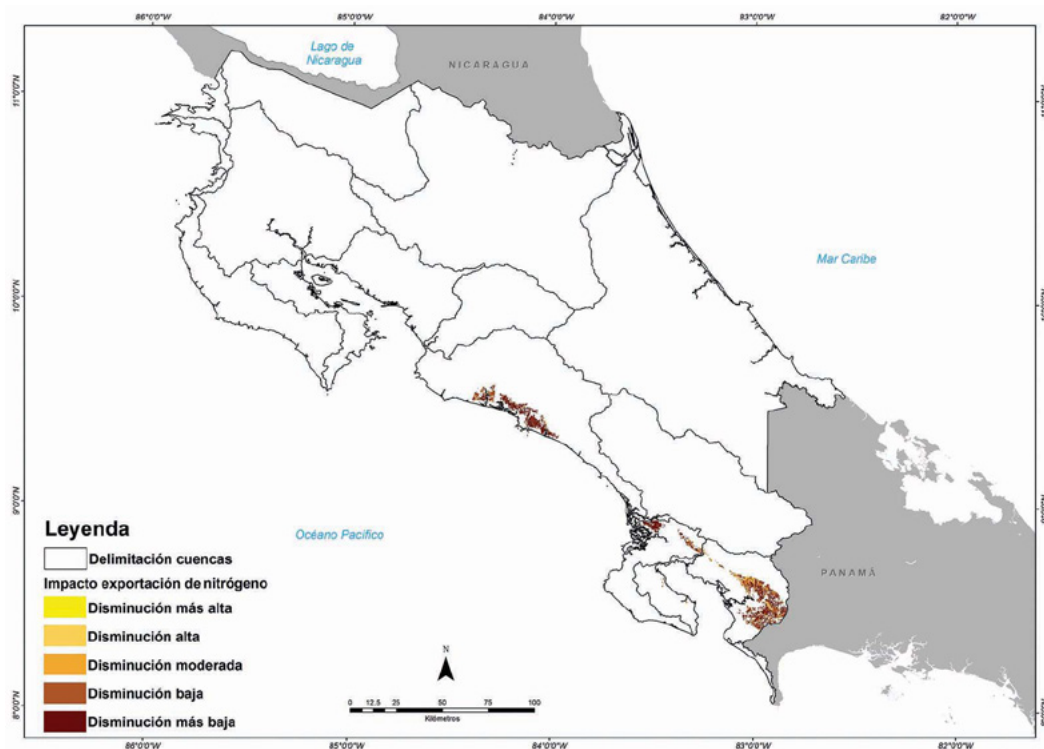
La adopción de fertilizantes de liberación lenta o controlada puede potencialmente lograr una reducción de las emisiones de nitrógeno en todas las áreas agrícolas de Costa Rica (World Bank, CIAT y CATIE, 2014) (Richards et al., 2015; Dislich et al., 2017). Por tal motivo, durante la evaluación ROAM, para el sector de la palma de aceite, también se consideró la

aplicación de fertilizantes con liberación lenta y/o controlada. A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de optimización que identificó las áreas prioritarias para desarrollar esta medida. Para una interpretación general de los resultados, referirse a la Sección 6.1.1 como ejemplo.



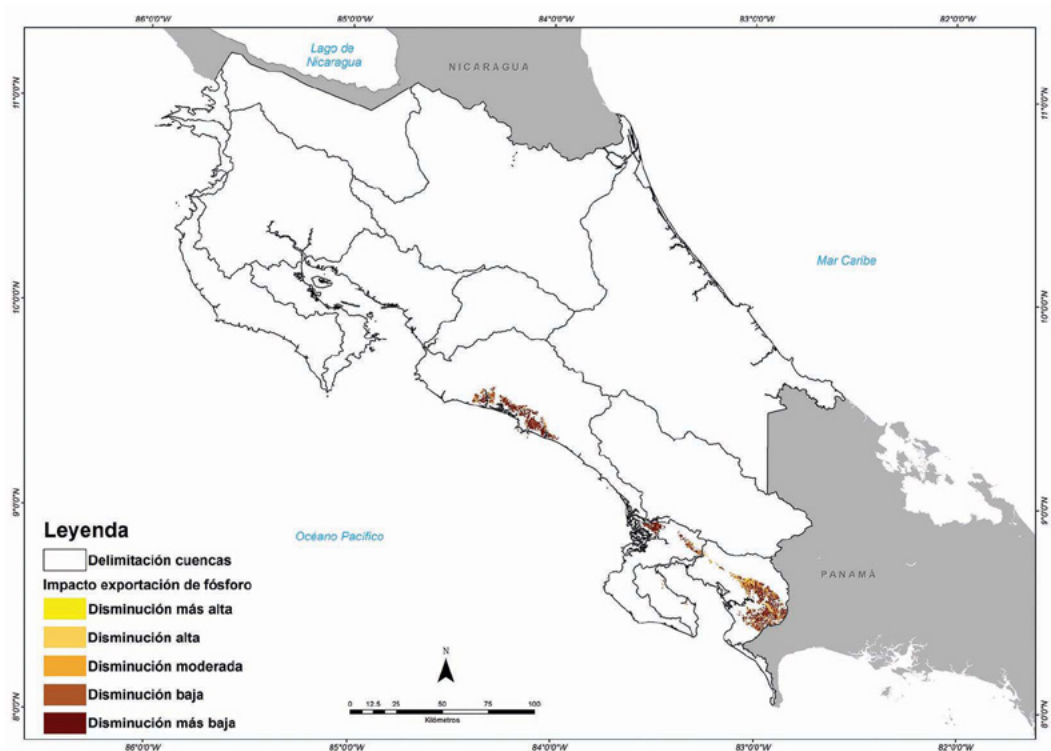
Mapa 63 Ubicación de zonas de cultivo de palma de aceite.

Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.



Mapa 64 Impacto de la implementación de las BPA en la exportación de nitrógeno proveniente de los cultivos de palma de aceite.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 65 Impacto de la implementación de las BPA en la exportación de fósforo proveniente de los cultivos de palma de aceite.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 66 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de palma de aceite, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



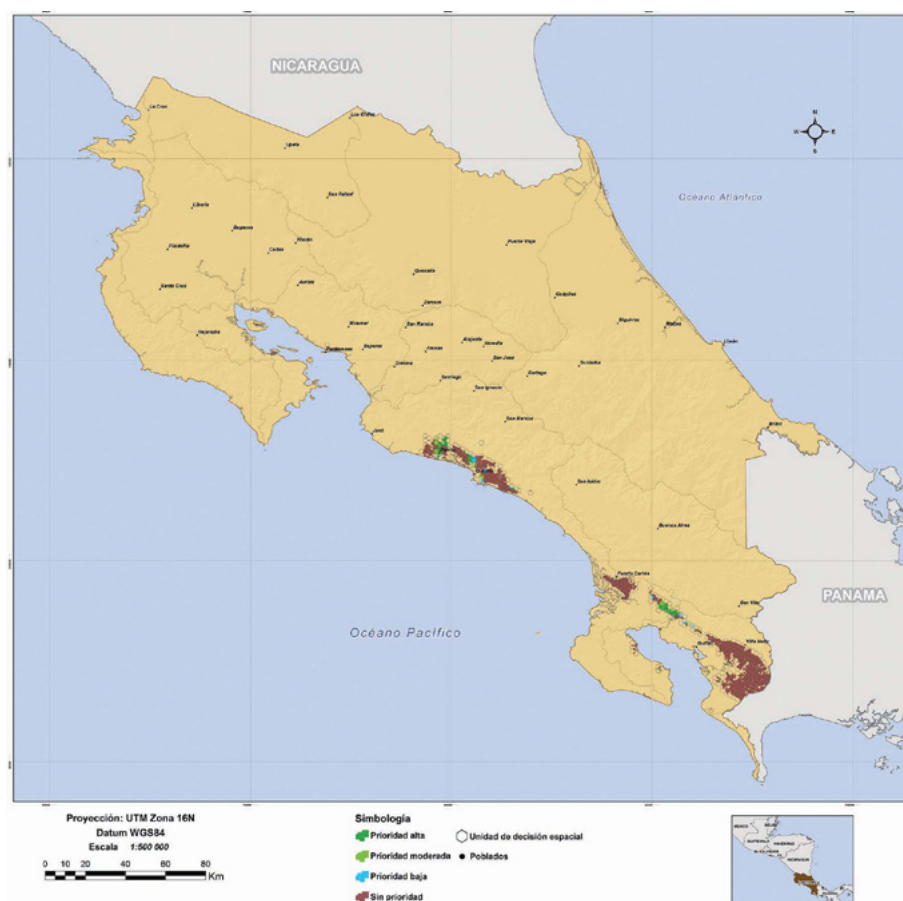
Mapa 67 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de palma de aceite, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 68 Optimización de ROOT en el área meta en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de palma de aceite, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 69 Áreas de priorización en zonas potenciales para la aplicación de BPA en cultivos de palma de aceite. Simbología según Figura 3.

Fuente: Elaboración propia.

6.4.4 Restauración de los bosques ribereños como buenas prácticas agrícola en los cultivos de piña, banano y palma de aceite

Finalmente, en las BPA se recomienda también la restauración de los bosques ribereños (CEGESTI, 2010). La reforestación no solo incrementa la captura de carbono para lograr una emisión neutra (CORBANA y Dole, 2013), sino que está establecida como una obligación en la Ley de Aguas (N ° 276, 1942) y en la Ley Forestal (7575, 1996).

La restauración de los bosques de galería con cultivos permanentes, al convertirse en zonas de amortiguamiento, representa otra oportunidad para disminuir los efectos nocivos que la erosión y la contaminación producen sobre las fuentes de agua. Además del mejoramiento en la provisión de los servicios ecosistémicos hidrológicos, el establecimiento de bosques con especies nativas y barreras de erosión alrededor de estas masas de agua, permitirá disminuir los efectos del desbordamiento de los cauces y, así, la amenaza de

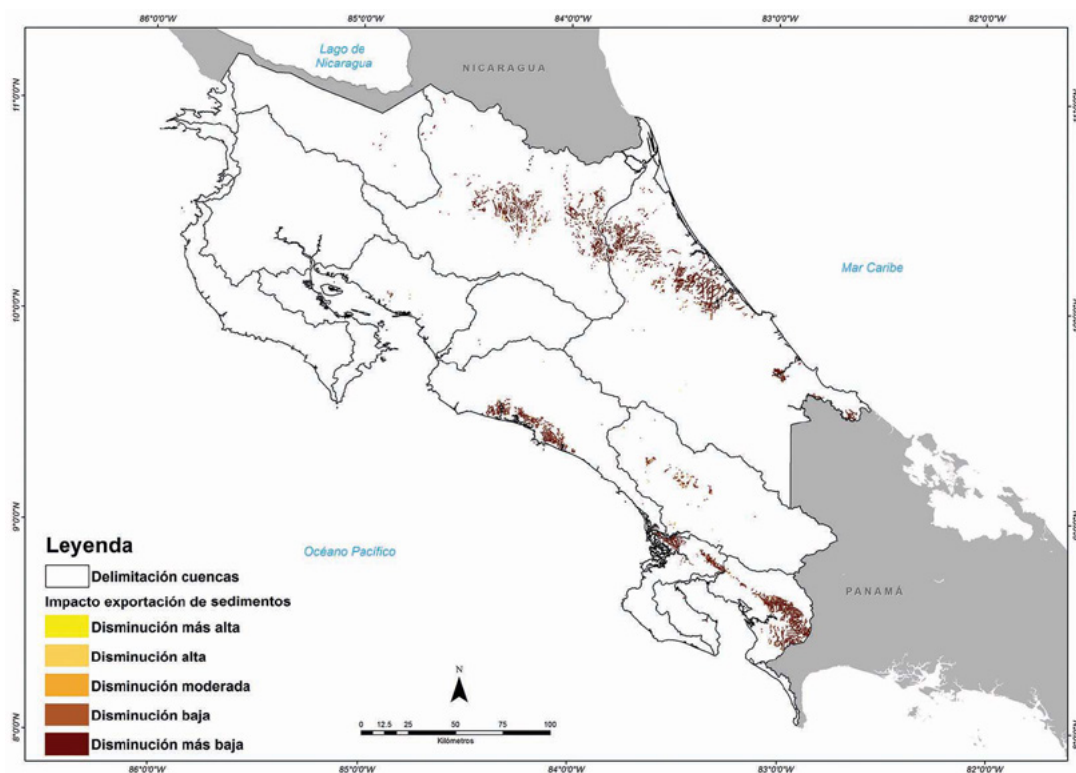
inundaciones, que causan enormes daños sociales y económicos en actividades productivas (Bouroncle et al. 2014). Asimismo, esta medida permitirá mejorar la continuidad y tránsito de especies al incrementar la conectividad de los paisajes fragmentados como corredores biológicos entre diferentes ecosistemas.

En este análisis se considera como una BPA, en cultivos de banano, piña y palma de aceite, la restauración de los bosques ribereños en una franja de tierra de 15 metros, como mínimo, para separar los cultivos de los bordes de los ríos (MAG, 2010). A continuación se presentan los resultados del análisis de optimización que identifica las áreas prioritarias para restaurar bosques ribereños. Para una interpretación general de los resultados, referirse a la Sección 6.1.1.



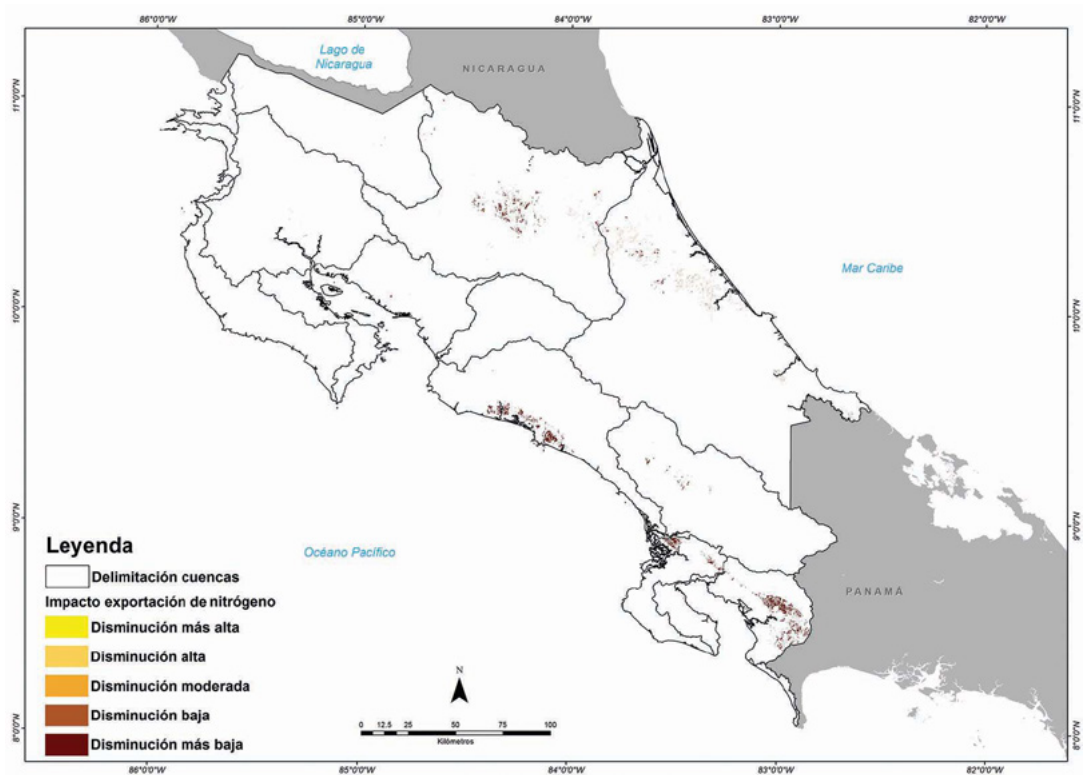
Mapa 70 Áreas potenciales para restaurar bosques ribereños en los cultivos de banano, piña y palma de aceite.

Fuente: Elaboración propia a partir de INBio, 2011.



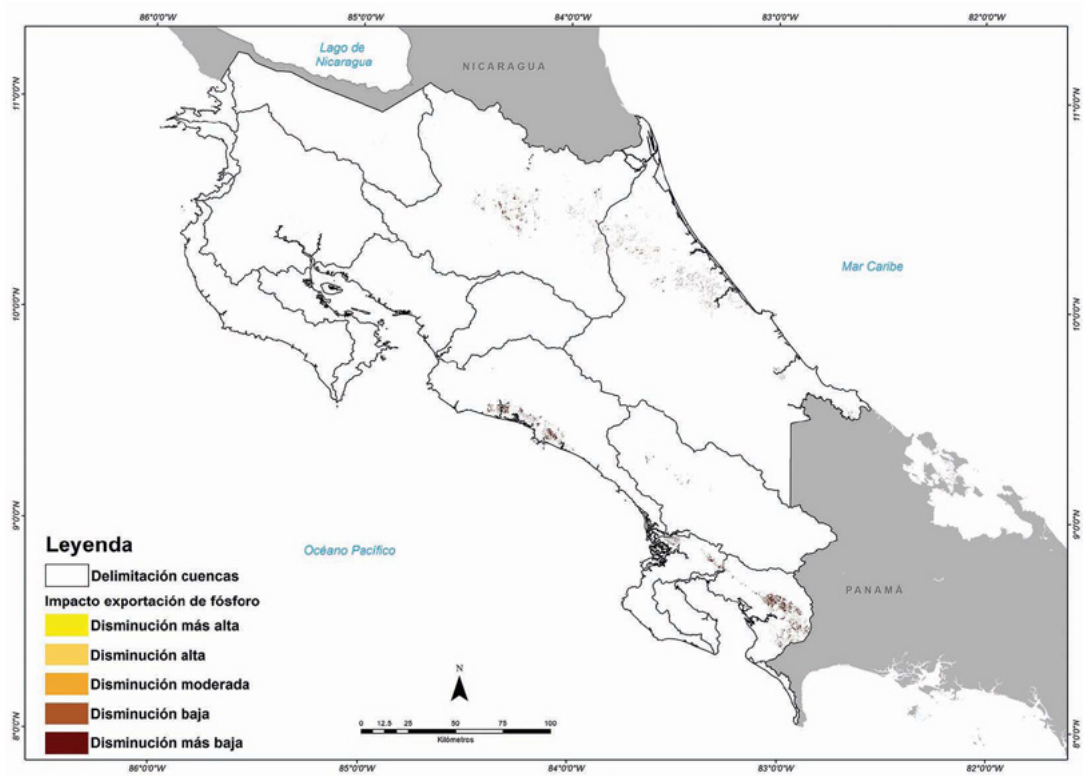
Mapa 71 Impacto de los bosques ribereños restaurados en la exportación de sedimentos provenientes de los cultivos de banano, piña y palma de aceite.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 72 Impacto de los bosques ribereños restaurados en la exportación de nitrógeno proveniente de los cultivos de banano, piña y palma de aceite.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 73 Impacto de los bosques ribereños restaurados en la exportación de fósforo proveniente de los cultivos de banano, piña y palma de aceite.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 74 Optimización de ROOT en el área meta en zonas de potencial restauración de bosque ribereño, asociado a cultivos de banano, piña y palma de aceite, utilizando solo mapas de impacto potencial. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 75 Optimización de ROOT en el área meta en zonas de potencial restauración de bosque ribereño, asociado a cultivos de banano, piña y palma de aceite, utilizando mapas de impacto potencial y de ubicación de los beneficiarios. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 76 Optimización de ROOT en el área meta en zonas de potencial restauración de bosque ribereño, asociado a cultivo de banano, piña y palma de aceite, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Simbología según Figura 2.

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 77 Áreas de priorización para la restauración de bosque ribereño en zonas de cultivo de banano, piña y palma de aceite. Simbología según Figura 4.

Fuente: Elaboración propia.

6.5 Priorización de todas las acciones de restauración

Además de las acciones mencionadas anteriormente, el Comité Técnico (2016) propuso medidas para detener la deforestación y la degradación forestal en bosques secundarios y maduros a través del ordenamiento de la conservación forestal. García-Rangel et al. (2017) realizaron un análisis espacial para definir las áreas prioritarias de estas acciones como parte de la puesta en marcha del Programa ONU-REDD en

Costa Rica. Para no duplicar los resultados, estas acciones fueron excluidas de este análisis.

Los resultados de los análisis de optimización de cada acción de restauración, consideradas en este estudio, fueron agrupadas en el Mapa 78, los resultados usados fueron los realizados a partir de las optimizaciones de los mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos. Es importante resaltar que los resultados cumplen con las áreas meta propuestas por cada acción.



Mapa 78 Optimización de todas las acciones de restauración según meta, utilizando mapas de impacto potencial, de beneficiarios y de corredores biológicos.

Fuente: Elaboración propia.

7 Conclusiones y recomendaciones

El enfoque de la RFPF aplicada en Costa Rica busca desarrollar un paisaje funcional y saludable, al mismo tiempo intenta fortalecer la resiliencia de los ecosistemas y las funciones ambientales que brindan servicios ecosistémicos. Este enfoque permite aportar a la toma de decisiones y de inversiones a través de propuestas de mosaicos de técnicas (agroforestales y ecológicas) para fortalecer la capacidad de recuperación de los paisajes y la provisión de beneficios a mediano y largo plazo. En este sentido, las aplicaciones de ROAM, InVEST y ROOT, como herramientas para la priorización espacial de acciones de restauración, basada en servicios ecosistémicos de áreas, permiten evidenciar los beneficios ecosistémicos de la RFPF y de otras buenas prácticas agrícolas.

Las medidas aquí planteadas están en concordancia con las prioridades de Costa Rica para transitar hacia una economía de carbono neutral y su meta de integrar la conservación de la biodiversidad en sus prioridades sectoriales. Desde el punto de vista agrícola, tanto el consumidor local como el importador de productos costarricenses, están buscando adquirir alimentos y productos manejados en forma ecológica e incluso orgánica, es decir sostenible. De esta manera, es necesario fortalecer la agricultura nacional que representa el 27% del total de las exportaciones de bienes del país, con el banano, la piña y el café, ocupando el segundo, tercer y quinto lugar, respectivamente. Estos productos tienen el mayor valor monetario de exportaciones del total que realiza Costa Rica (COMEX, 2019).

Según el Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible (PEN, 2015), dentro de las principales amenazas que sufren los ecosistemas boscosos de Costa Rica están el cambio climático, el déficit hídrico, los incendios, la extracción ilegal de flora, la deforestación a pequeña escala y el uso de plaguicidas en monocultivos establecidos en áreas circundantes a los parches boscosos. Estos aspectos

serían atendidos con la puesta en marcha de las acciones planteadas.

Frente a una demanda de fortalecimiento de la agricultura nacional y de las metas de restauración comprometidas con el Desafío de Bonn, se considera oportuno mencionar que es necesario mejorar el acceso a las semillas de alta calidad genética, así como a la red de viveros actuales, ya que su ausencia podría obstaculizar las ambiciones de alcanzar las metas de la restauración. En este sentido, los nuevos proveedores de semillas y viveros podrían ser manejados por pequeñas empresas y habilitados mediante préstamos o planes de inversión, para lo cual se necesitaría proporcionar, además, asistencia técnica y creación o fomento de capacidades sobre los enfoques básicos de restauración, así como una mejoría de la comunicación entre los agricultores y el Estado.

Dentro de los beneficios que se obtienen al aplicar las medidas exploradas en este estudio destacan:

- Restaurar paisajes con enfoque en sitios específicos, lo cual permite equilibrar un mosaico de usos de suelo interdependientes integrando diversas actividades productivas al mismo tiempo que mejora la resiliencia de los ecosistemas y su conectividad;
- involucrar activamente a las partes locales interesadas en las decisiones relativas a las metas de restauración, los métodos de implementación y las compensaciones, fortaleciendo con ello las alianzas estratégicas; y por ende la adaptación de las estrategias de restauración a los contextos sociales, económicos y ecológicos locales;
- aportar al bienestar humano, su salud, calidad de vida y acceso a servicios ecosistémicos, gracias a la recuperación de las funciones ecosistémicas;

- contar con un portafolio de estrategias de restauración que sean adaptables a los avances científicos relacionados con la RFPF, así, como demandas sociales y políticas.

Los resultados presentados en las secciones anteriores proporcionan a los/as tomadores/as de decisiones y a los/as ejecutores/as del programa, información sobre dónde implementar programas y acciones de restauración, de manera prioritaria, para lograr el mayor impacto positivo en la provisión de servicios ecosistémicos relacionados con la calidad del agua. El uso de mapas de impacto potencial y de beneficiarios permitió relacionar áreas con mayor impacto potencial en la exportación de sedimentos y nutrientes, con aquellas áreas de mayor demanda de cambios, maximizando los beneficios para la población de las diferentes acciones de restauración.

La inclusión de mapas de beneficiarios con la aplicación de ROOT, prioriza áreas de restauración incorporando un enfoque más humano, lo que asegura que las acciones se desarrollen donde se maximizan los beneficios, tanto, para el funcionamiento ecológico como para el bienestar humano. De la misma manera, considerar a los beneficiarios en los planes de restauración puede atraer alianzas de financiamiento con otras partes de la economía, por ejemplo, empresas hidroeléctricas que se benefician con la disminución de sedimento asociados con la restauración del paisaje.

Además de identificar las áreas de restauración correspondientes a cada área meta, ROOT también permite identificar áreas más pequeñas, tales como las primeras 2000 ha que deben ser priorizadas para iniciar el desarrollo del programa. Una ventaja adicional de ROOT es que incluye otros criterios de priorización para responder a las demandas de diferentes actores, y/o para facilitar un cambio en la orientación de las políticas. Para esto se puede realizar análisis de priorización adicionales, no solo agregando capas extras al modelo de base de ROOT, sino ejecutando de nuevo el modelo usando las optimizaciones anteriores como insumos para su operación. Esta flexibilidad es útil para adaptar las áreas prioritarias de la RFPF a diferentes demandas. Uno de los principales aportes de este estudio es haber identificado las tierras degradadas y oportunidades para su restauración, para priorizar los sitios con la mayor probabilidad de mejorar, en este caso, los servicios ecosistémicos hidrológicos. Sin embargo, este mismo ejercicio podría hacerse integrando con otros criterios, tales como, el mejoramiento de la productividad agrícola, la seguridad alimentaria, el aumento de los ingresos rurales, una mayor resiliencia al cambio climático o la reducción de la vulnerabilidad a los deslizamientos de tierra y otros desastres.

Los resultados del ROAM permiten también orientar las diferentes alternativas de restauración para el cumplimiento

de las NAMA relacionados con la agenda agroambiental, el fortalecimiento de las BPA, los planes sectoriales, entre otros. Al mismo tiempo, se influye de manera positiva en los mecanismos internacionales de financiamiento, como el de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques (REDD +). Todo lo anterior bajo criterios de sostenibilidad ecológica y atención social resaltados en los ODS.

La valoración económica no fue considerada en este análisis para evitar sesgos en la determinación de oportunidades de optimización de los servicios ecosistémicos hidrológicos para poblaciones humanas. Sin embargo, una vez obtenidos los resultados y agregando nuevas capas de información, se puede obtener, como un insumo adicional, el costo evitado en la provisión de estos servicios ecosistémicos, así como las ganancias que se pueden generar por ejemplo con los PPSA, los bonos de carbono, el turismo, la provisión de bienes específicos, entre otros, e inclusive servir de insumos en temas relacionados con la gestión del riesgo, como el reporte por daños y pérdidas ante desastres y la medición de impactos frente a proyectos de desarrollo, entre otros.

Para poder formular las prioridades nacionales de la RFPF, de manera integral, es necesario contar con una visión compartida y coordinación entre los ministerios y sectores relacionados. Una oportunidad para lograr este objetivo se está construyendo con La Estrategia Nacional de Restauración de Paisajes de Costa Rica 2021-2050. Esta estrategia busca establecer mesas sectoriales para la restauración del paisaje rural, marino costero, y urbano, para facilitar la necesaria articulación entre sectores dentro de un marco filosófico, estratégico y programático que permita la exitosa realización de la restauración. Los resultados de priorización presentados en este estudio contribuyen al desarrollo de esta estrategia como ejemplo de metodología para motivar y permitir otras conversaciones que unifiquen los planes de restauración nacional.

Bibliografía

- Arriagada, R.A. et al. (2012). 'Do payments for environmental services affect forest cover? A farm-level evaluation from Costa Rica'. *Land Economics* 88:382–399.
- Balthazar, V. et al. (2015). 'Impacts of forest cover change on ecosystem services in high Andean mountains'. *Ecological Indicators* 48: 63–75. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.043>
- Bockstael, N. et al. (1995). 'Ecological economic modeling and valuation of ecosystems', *Ecological Economics* 14:143–159. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(95\)00026-6](https://doi.org/10.1016/0921-8009(95)00026-6)
- Bonn Challenge (2019). *Bonn Challenge*. Home Page. Disponible en: <https://www.bonnchallenge.org/>
- Bonn Challenge (2017a). *Bonn Challenge*. Home Page. Disponible en: <http://www.bonnchallenge.org/> (Accesed: 13 September 2017).
- Bonn Challenge (2017b). *Costa Rica, Bonn Challenge. Commitments*. Disponible en: <https://www.bonnchallenge.org/pledges/costa-rica> (Accessed: 18 September 2017).
- Boos, D. et al. (2014). 'How Are INDCs and NAMAs Linked? A Discussion Paper on the Links between INDCs, NAMAs and LEDS by the GIZ TUEWAS NAMA Working Group in Collaboration with the UNEP DTU Partnership'. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: Eschborn, Germany. Disponible en: <https://tuewas-asia.org/wp-content/uploads/2017/05/How-are-INDCs-and-NAMAs-linked.pdf>
- Bouroncle, C., Imbach, P., Läderach, P., Rodríguez, B., Medellín, C. and Fung, E. (2014). *La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación?* Disponible en: https://www.cac.int/sites/default/files/An%C3%A1lisis_de_Vulnerabilidad_Costa_Rica.pdf
- Bradshaw, A.D. (2002). 'Introduction and philosophy', in Perrow, M.R. and Davy, A.J. (eds.). *Handbook of Ecological Restoration* 1: 3–9. Principles of Restoration. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Brancalion, P.H.S. and Chazdon, R.L. (2017). 'Beyond hectares: four principles to guide reforestation in the context of tropical forest and landscape restoration: Forest and landscape restoration principles', *Restoration Ecology* 25:491–496. <https://doi.org/10.1111/rec.12519>
- Brauman, K.A. et al. (2007). 'The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services', *Annual Review of Environment and Resources* 32: 67–98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Calvo-Alvarado, J.C., Jiménez-Rodríguez, C.D. y Jiménez-Salazar, V. (2014). 'Determining Rainfall Erosivity in Costa Rica: A Practical Approach'. *Mountain Research Development*, 34:48–55. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-13-00062.1>
- Cavender-Bares, J. et al. (2015). 'Ecosystem service trade-offs across global contexts and scales', *Ecology and Society*, 20(1). <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07137-200122>
- Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) (2015). 'Next steps of the Livestock NAMA in Costa Rica. Info Note.' CGIAR. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/rest/bitstreams/91287/retrieve>
- Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI) (2010). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas*. 1st edn. San José, Costa Rica: Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI). Disponible en: http://www.cegesti.org/manuales/download_manual_bpa/manual_bpa.pdf
- Chazdon, R.L. et al. (2017). 'A Policy-Driven Knowledge Agenda for Global Forest and Landscape Restoration:

- A policy-driven agenda for restoration', *Conservation Letters*, 10: 125–132. <https://doi.org/10.1111/conl.12220>
- Chazdon, R.L. and Laestadius, L. (2016). 'Forest and landscape restoration: Toward a shared vision and vocabulary', *American Journal of Botany* 103: 1869–1871. <https://doi.org/10.3732/ajb.1600294>
- Chetkiewicz, C.-L.B., St. Clair, C.C. and Boyce, M. S. (2006). 'Corridors for Conservation: Integrating Pattern and Process', *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37: 317–342. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110050>
- Choi, Y.D. (2007). 'Restoration Ecology to the Future: A Call for New Paradigm', *Restoration Ecology* 15: 351–353. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00224.x>
- Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) (2014). *Base de datos de perfiles de Suelos de Costa Rica, versión 1.1*. Disponible en: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=13
- Coetzee, K. and Winkler, H. (2014). 'The international policy context for mitigation actions', *Climate and Development* 6(sup1):4–11. <https://doi.org/10.1080/17565529.2013.867245>
- Comité Técnico (2016). *Plan Maestro de Restauración de Tierras en Costa Rica. Documento preliminar*. San José, Costa Rica: MAG, MINAE.
- Ministerio de Comercio Exterior (COMEX) (2019). *Análisis Sobre la Evolución del Comercio Exterior e IED en Costa Rica: en 2019*. Disponible en: <https://www.comex.go.cr/media/8088/ana-lisis-sobre-la-evolucion-del-comercio-exterior-e-ied-en-costa-rica-2019final.pdf>
- Corporación Bananera Nacional (CORBANA) and Dole (2013). *Thanks to public and private initiative, the banana sector is striving to achieve carbon neutrality. Tropical agriculture gears up for climate change, Costa Rica Carbon Neutral 2021*. San José, Costa Rica: MAG, MINAET, CATIE, IICA, GIZ.
- Dirección de Aguas (DA) (2016). *Dirección de Aguas Data Portal*. Disponible en: <http://mapas.da.go.cr/geonet-work/srv/spa/catalog.search#/home> (Accessed: 18 November 2016).
- De Beenhouwer, M., Aerts, R. and Honnay, O. (2013). 'A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry'. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 175: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.003>
- van Dijk, A.I.J.M. and Keenan, R.J. (2007) 'Planted forests and water in perspective', *Forest Ecology and Management* (Planted Forests and Water) 251: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.010>
- Dislich, C. et al. (2017). 'A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system', *Biological Reviews* 92:1539–1569. <https://doi.org/10.1111/brev.12295>
- Dudley, N. and Aldrich, M. (2007). *Five Years of Implementing Forest Landscape Restoration. Lessons to date*. Gland, Switzerland: WWF International, p. 23. Disponible en: <https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/flrlessonslearntbooklet.pdf>
- Durán Zuazo, V.H. and Rodríguez Pleguezuelo, C. R. (2008). 'Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review', *Agronomy for Sustainable Development* 28: 65–86. <https://doi.org/10.1051/agro:2007062>
- Food and Agriculture Organisation (FAO) (1996). *Land husbandry - Components and strategy*. 70. Rome, Italy: Natural Resources Management and Environment Department of FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/t1765e/t1765e00.htm>
- Food and Agriculture Organisation (FAO) (2003). *Development of a Framework for Good Agricultural Practices. Seventh Session of Committee on Agriculture*. Rome, Italy: FAO. Disponible en: <https://www.fao.org/3/Y8704e/Y8704e.htm>
- Fernández-Moya, J. et al. (2014). 'Soil erosion under teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations: General patterns, assumptions and controversies'. *CATENA* 123: 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.010>
- Fischer, J., Lindenmayer, D.B. and Manning, A.D. (2006). 'Biodiversity, ecosystem function, and resilience: ten guiding principles for commodity production landscapes'. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4: 80–86. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004\[0080:BEFART\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0080:BEFART]2.0.CO;2)
- Fisher, B., Turner, R.K. and Morling, P. (2009). 'Defining and classifying ecosystem services for decision making'. *Ecological Economics* 68: 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) (2014). *Modalidades Pago de Servicios Ambientales*. San José, Costa Rica: FONAFIFO. Disponible en: http://www.fonafifo.go.cr/psa/modalidades_psa.html (Accessed: 29 August 2017).
- Fundecooperación and Icafé (2013). *NAMA Café: una herramienta para el desarrollo bajo en emisiones*. San José, Costa Rica: Fundecooperación and Icafé. Disponible en: https://www.cac.int/sites/default/files/MAG_Costa_Rica_NAMA_caf%3a9_una_herramienta_para_el_desarrollo_bajo_en_emisiones_2013..pdf
- García Muñoz, A. and Rodríguez Murillo, M. (2011). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para la producción de piña en Costa Rica. Proyecto 'Colombia, Costa Rica, Nicaragua: Reduciendo el Esguerrimiento de Plaguicidas al mar Caribe'*. San José, Costa Rica:

- PNUMA y Banacol. Disponible en: <https://docplayer.es/3363683-Manual-de-buenas-practicas-agricolas-para-la-produccion-de-pina-en-costa-rica.html>
- García-Rangel, S. et al. (2017). *Beneficios múltiples de REDD+ en Costa Rica: Análisis espaciales para apoyar la toma de decisiones*. Cambridge, UK: UNEP-WCMC. Disponible en: <http://www.unredd.net/documents/global-programme-191/multiple-benefits/studies-reports-and-publications-1364/16031-beneficios-multiples-de-redd-en-costa-rica-analisis-espaciales-para-apoyar-la-toma-de-decisiones.html>
- Goldstein, J.H. et al. (2017). 'Spatial planning for a green economy: National-level hydrologic ecosystem services priority areas for Gabon'. *PLOS ONE* 12: e0179008. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179008>
- Gourevitch, J.D. et al. (2016). 'Optimizing investments in national-scale forest landscape restoration in Uganda to maximize multiple benefits'. *Environmental Research Letters* 11: 114027. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/11/114027>
- de Groot, R.S. et al. (2010). 'Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making'. *Ecological Complexity. (Ecosystem Services—Bridging Ecology, Economy and Social Sciences)* 7: 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
- Guerry, A.D. et al. (2015). 'Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice'. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: 7348-7355. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503751112>
- Guevara, D. and Herrera Murillo, J. (2014). *Informe de Calidad de Aguas Superficiales*. Municipality of San José, Costa Rica.
- Harvey, C.A. et al. (2005). 'Contribution of live fences to the ecological integrity of agricultural landscapes'. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111: 200-230. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.011>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario. Resultados generales*. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/U40-10581.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2011). *Censos 2011*. Disponible en: <http://www.inec.go.cr/censos/censos-2011> (Accessed: 17 March 2017).
- IUCN and WRI (2014). A guide to the Restoration Opportunities Assessment Methodology (ROAM): Assessing forest landscape restoration opportunities at the national or sub-national level. Working Paper (Road-test edition). Gland, Switzerland: IUCN, 125 pp.
- Jax, K. et al. (2013). 'Ecosystem services and ethics'. *Ecological Economics* 93: 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.008>
- Keeler, B.L. et al. (2012). 'Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services'. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109:18619-18624. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215991109>
- Knight, R.L. et al. (2000). 'Constructed wetlands for livestock wastewater management'. *Ecological Engineering* 15: 41-55. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(99\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(99)00034-8)
- Kovacs, K. et al. (2013). 'Evaluating the Return in Ecosystem Services from Investment in Public Land Acquisitions'. *PLOS ONE* 8: e62202. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062202>
- Lager, T. and Wikström, M. (2007). 'Polluted domestic water in Costa Rica'. Degree Thesis in Economics. SLU, Department of Economics. Disponible en: <http://epsilon.slu.se/1517/> (Accessed: 11 September 2017).
- Latawiec, A. E. et al. (2015). 'Creating space for large-scale restoration in tropical agricultural landscapes'. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13: 211-218. <https://doi.org/10.1890/140052>
- Lawler, J. J. et al. (2014). 'Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States'. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 7492-7497. <https://doi.org/10.1073/pnas.1405557111>
- Leibowitz, S.G. (2003). 'Isolated wetlands and their functions: An ecological perspective'. *Wetlands*, 23: 517-531. [https://link.springer.com/article/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0517:IWATFA\]2.0.CO;2](https://link.springer.com/article/10.1672/0277-5212(2003)023[0517:IWATFA]2.0.CO;2)
- Lele, S. (2009). 'Watershed services of tropical forests: from hydrology to economic valuation to integrated analysis'. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1: 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.10.007>
- Liu, C.H. et al. (2013). 'The effects of composted pineapple residue return on soil properties and the growth and yield of pineapple'. *Journal of soil science and plant nutrition* 13: 433-444.
- Lubowski, R.N., Plantinga, A. J. and Stavins, R. N. (2006). 'Land-use change and carbon sinks: Econometric estimation of the carbon sequestration supply function'. *Journal of Environmental Economics and Management* 51: 135-152. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2005.08.001>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) (2010). *Manual de buenas prácticas agrícolas para la producción de Piña*. Heredia, Costa Rica: MAG, Servicio Fitosanitario

- del Estado. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00184.pdf>
- MAG (2015a). *Estrategia de Ganadería baja en Carbono en Cosa Rica: Informe Final, Estrategia y Plan de Acción*. San José, Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería. Disponible en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/L01-11006.pdf>
- MAG (2015b). *NAMA Ganadería Costa Rica, 2015*. MAG, San José, Costa Rica: MAG. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/L01-10885.pdf>
- MAG (2017). '350 fincas ganaderas aplican acciones Eco-competitivas que apoyan la mitigación y adaptación al cambio climático', *Noti MAG*. Disponible en: <http://prensamag.blogspot.com/2017/08/350-fincas-ganaderas-aplican-acciones.html>
- Mansourian, S. et al. (2017). 'Forest Landscape Restoration: increasing the positive impacts of forest restoration or simply the area under tree cover?'. *Restoration Ecology* 25:178–183. <https://doi.org/10.1111/rec.12489>
- Mansourian, S. (2017). 'Governance and forest landscape restoration: A framework to support decision-making'. *Journal for Nature Conservation* 37: 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.02.010>
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2005). *Ecosystems and human well-being. Health Synthesis. A Report of the Millennium Ecosystem Assessment*. France: World Health Organization. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43354/9241563095.pdf>
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN) (2014). *Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018 'Alberto Cañas Escalante'*. San José, Costa Rica: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. Disponible en: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-nacional-de-desarrollo-alberto-canas-escalante-de-costa-rica-2015-2018>
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) (2011). *Plan Nacional de Desarrollo Forestal 2011-2020*. San José, Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía. Disponible en: https://www.sirefor.go.cr/pdfs/tematicas/Politicar_Nacionales/Plan_Nacional_Desarrollo_Forestal_2011-2020.pdf
- MINAE (2015). *Política Nacional de Biodiversidad 2015-2030 Costa Rica*. San José, Costa Rica: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Disponible en: <http://www.conagebio.go.cr/Conagebio/public/documentos/POLITICA-NACIONAL-DE-BIODIVERSIDAD-2015.pdf>
- MINAE (2018). *Plan nacional de descarbonización 2018-2050*. Disponible en: <https://minae.go.cr/noticias-minae/documentos/86-plan-de-descarbonizacion>
- MINAE and IMN (2014). *Tercera comunicación nacional: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. San José, Costa Rica: MINAE and IMN.
- MINAE, MAG and UNDP (2014). *Livestock NAMA Concept. Towards a more eco-competitive livestock sector*. San José, Costa Rica: Dirección Cambio Climático, MINAE.
- MINAE, Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) y MAG (2021). *Estrategia nacional de restauración de paisajes de Costa Rica (EN5-CR) 2021–2050*. San José, Costa Rica: MINAE, SINAC, MAG. Disponible en: http://www.sinac.go.cr/ES/noticias/Documents/Estrategia%20Nacional%20de%20Restauraci%C3%B3n%20de%20Paisajes%20de%20Costa%20Rica_digital_vf.pdf
- Mitsch, W.J., Horne, A.J. and Nairn, R.W. (2000). 'Nitrogen and phosphorus retention in wetlands-ecological approaches to solving excess nutrient problems'. *Ecological Engineering* 14: 1–7.
- Murcia, C. et al. (2016). 'Challenges and Prospects for Scaling-up Ecological Restoration to Meet International Commitments: Colombia as a Case Study'. *Conservation Letters* 9: 213–220. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/conl.12199>
- Natural Capital Project and IUCN (2017). *ROOT User's Guide*. Natural Capital Project, Stanford, USA. Disponible en: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software>
- Nieters, A. et al. (2016). *NAMA Café Costa Rica – A Tool for Low-Carbon Development*. NAMA Facility Technical Support Unit. Disponible en: https://www.namacafe.org/sites/default/files/files/NAMA_Facility_factsheet_Costa%20Rica.pdf
- Ojea, E., Martín-Ortega, J. and Chiabai, A. (2012). 'Defining and classifying ecosystem services for economic valuation: the case of forest water services'. *Environmental Science & Policy* 19:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.02.002>
- Pagiola, S. (2008). 'Payments for environmental services in Costa Rica'. *Ecological Economics* 65: 712–724. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.033>
- Programa Estado de la Nación (PEN) (2015). *Vigésimo primer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Disponible en: <http://www.estadonacion.or.cr/21/assets/pen-21-2015-baja.pdf>
- Pinto, S.R. et al. (2014). 'Governing and Delivering a Biome-Wide Restoration Initiative: The Case of Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil'. *Forests* 5: 2212–2229. <https://doi.org/10.3390/f5092212>

- Power, A.G. (2010). 'Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies'. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365:2959–2971. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>
- Quesada-Solís, K. et al. (2005). 'Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad cham-paka) como material de refuerzo en resinas de poliéster'. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 6:157–179.
- Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G.D. and Bennett, E.M. (2010). *Ecosystem service bundles for analyzing trade-offs in diverse landscapes. Proceedings of the National Academy of Sciences* 107:5242–5247. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907284107>
- Reed, J. et al. (2016). 'Integrated landscape approaches to managing social and environmental issues in the tropics: learning from the past to guide the future'. *Global Change Biology* 22:2540–2554. <https://doi.org/10.1111/gcb.13284>
- Richards, M.B. et al. (2015). 'Site-Specific Nutrient Management: Implementation guidance for policymakers and investors. PRACTICE BRIEF Climate-smart agriculture.' Rome, Italy: GACSA. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10568/69016>
- Robalino, J. and Pfaff, A. (2013). 'Ecopayments and Deforestation in Costa Rica: A Nationwide Analysis of PSA's Initial Years'. *Land Economics* 89: 432–448. <https://doi.org/10.3368/le.89.3.432>
- Rodríguez, J. et al. (2006). 'Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services'. *Ecology and Society* 11(1). <https://doi.org/10.5751/ES-01667-110128>
- Ronen, E. (2010). 'Nuevas tecnologías de fertilización de la palma de aceite'. *Revista Palmas* 31:191–204.
- Ruckelshaus, M. et al. (2015). 'Notes from the field: Lessons learned from using ecosystem service approaches to inform real-world decisions'. *Ecological Economics* (Ecosystem Services Science, Practice, and Policy: Perspectives from ACES, A Community on Ecosystem Services) 115:21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.07.009>
- Rusi, D. et al. (2013). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands*. Executive Summary. Institute for European Environmental Policy (IEEP) & Ramsar Secretariat. Disponible en: http://www.teebweb.org/wp-content/uploads/2013/04/TEEB_WaterWetlands_ExecSum_2013.pdf (Accessed: 10 September 2017).
- Sasa, M. et al. (2015). 'Seasonal wetlands in the Pacific coast of Costa Rica and Nicaragua: environmental characterisation and conservation state'. *Limnetica*, 34:1-16. Disponible en: <http://roderic.uv.es/handle/10550/53953> (Accessed: 10 September 2017).
- Scherr, S.J. and McNeely, J. A. (2008). 'Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of "ecoagriculture" landscapes'. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363: 477–494. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2165>
- Seaman, B.S. and Schulze, C. H. (2010). 'The importance of gallery forests in the tropical lowlands of Costa Rica for understory forest birds', *Biological Conservation*, 143: 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.11.002>
- Sharp, R., et al. (2016). *INVEST +VERSION+ User's Guide*. The Natural Capital Project, Universidad de Stanford, Universidad de Minnesota, The Nature Conservancy, y World Wildlife Fund.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) (2014). *Atlas Digital de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: TEC,
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) (2007). 'GRUAS II: 'Propuesta de ordenamiento territorial para la conservación de la biodiversidad en Costa Rica'. Volumen I. *Análisis de vacíos en la representatividad e integridad de la biodiversidad terrestre*. San José, Costa Rica: SINAC-MINAE. Disponible en: <http://www.bio-nica.info/biblioteca/SINAC2007AnalisisVacioCR.pdf>
- SINAC (2017a). *Corredores Biológicos_2017*. Disponible en: <http://www.sinac.go.cr/ES/partciudygober/Paginas/pncb.aspx> (Accessed: 20 February 2017).
- SINAC (2017b). *Mapa Corredores Biológicos*. Disponible en: <http://www.sinac.go.cr/ES/correbiolo/Paginas/mapacb.aspx> (Accessed: 25 July 2017).
- Stanturf, J. et al. (2014). 'Forest restoration paradigms'. *Journal of Sustainable Forestry* 33: 161–194.
- Tabilo-Valdivieso, E. (1997). *El beneficio de los humedales en América Central*. Turrialba, Costa Rica: WWF Oficina Regional para Centroamérica. Disponible en: <http://www.centroneotropical.org/wp-content/uploads/2017/01/BENEFICIO-HUMEDALES-AMERICA-CENTRAL-1997.pdf> (Accessed: 10 September 2017).
- Terrado, M. et al. (2014). 'Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin'. *Ecological Indicators* 37, Part A: 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.016>
- Toft, J.E. et al. (2013). 'From mountains to sound: modelling the sensitivity of Dungeness crab and Pacific oyster to land–sea interactions in Hood Canal, WA'. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, p. fst072. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst072>
- Tscharntke, T. et al. (2011). 'Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes

– a review'. *Journal of Applied Ecology* 48: 619–629.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>

UNFCCC (2014). *NS-71 - Costa Rica Livestock NAMA Costa Rica. NAMA Seeking Support for Implementation*. UNFCCC. Disponible en: https://www4.unfccc.int/sites/PublicNAMA/_layouts/un/fccc/nama/NamaSeeking-SupportForImplementation.aspx?ID=91&viewOnly=1

Varnell, C.J., Thawaba, S. A. and Solis, M. (2010). 'Typha Domingeniensis—A Potential Tool for Bioremediation of Wetlands as Relevant to Environmental Forensics: A Case Study from Palo Verde, Costa Rica'. *Environmental Forensics* 11: 102–107. <https://doi.org/10.1080/15275920903558364>

Veldkamp, E. and Keller, M. (1997). 'Nitrogen oxide emissions from a banana plantation in the humid tropics'. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102:15889–15898. <https://doi.org/10.1029/97JD00767>

Vogl, A. L. et al. (2017). *Ecosystem Services in Forest Landscape Restoration Assessments*. <https://drive.google.com/drive/folders/0BxMaelcqA9XjYUI2OWlaXy1vWWc?resourcekey=0-ZEWup9miEyEY4tPOigy4uA>

Vogl, A. L. et al. (2016). 'Managing forest ecosystem services for hydropower production'. *Environmental Science & Policy* 61: 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.014>

World Bank, CIAT and CATIE (2014). *Climate-Smart Agriculture in Costa Rica*. Washington DC, USA: World Bank Group. Disponible en: <http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/doc/agricultureProfiles/CSA-in-Costa-Rica.pdf>.

WorldClim. 2016. WorldClim Versión 1. Disponible en: <http://www.worldclim.org/version1>. Recuperado 18 Noviembre, 2016.

Anexos

Anexo 1 Miembros del Comité Técnico

Gilbert Canet (MINAE²²)
Coordinador

Ronnie de Camino (CATIE)
Mauricio Chacón (MAG)
Mario Coto (SINAC)
Maricela Muñoz
Guillermo Navarro (CATIE)
German Obando (UICN)
Luis Aguilar
Róger Villalobos (CATIE)
Mauricio Sánchez
Héctor Arce (FONAFIFO)
Felipe Carazo (Fundecor)

²² Institución a la que pertenecía durante la operación del Comité Técnico.

Anexo 2

Cuadro con datos biofísicos utilizados en los modelos y fuentes de InVEST

Cuadro A1 Variables biofísicas de los usos actuales del suelo para los modelos NDR y SDR

Uso de tierra	Factor C	Factor P	Eficiencia de retención de sedimentos	Carga N	Eficiencia de retención N	Carga P	Eficiencia de Retención
Infraestructura	0,011 ⁽¹⁾	1000 ⁽²⁾	0,050 ⁽³⁾	6.300 ⁽⁴⁻⁸⁾	0,050 ⁽³⁻⁵⁾	1.800 ⁽⁴⁻⁸⁾	0,050 ⁽³⁾
Tierra estéril	0,883 ^(1,9,10)	1.000 ⁽²⁾	0,260 ⁽¹¹⁾	0,035 ^(4,5)	0,050 ⁽³⁾	0,001 ⁽³⁻⁵⁾	0,050 ⁽³⁻⁵⁾
Agua	0,000 ^(1,9)	1000 ⁽²⁾	0,200 ⁽¹¹⁾	0,000 ^(3-5,12)	0,020 ^(3,5,13)	0,000 ⁽³⁻⁵⁾	0,020 ^(3,5,13)
Otros cultivos	0,420 ⁽³⁾	1000 ⁽²⁾	0,350 ⁽⁴⁾	27.000 ⁽¹⁴⁻²⁰⁾	0,250 ⁽³⁾	2.500 ⁽¹⁴⁻²⁰⁾	0,250 ⁽³⁾
Sabana (Pastoreo natural)	0,008 ⁽²¹⁾	1000 ⁽²⁾	0,845 ⁽¹¹⁾	4.000 ⁽³⁾	0,400 ⁽³⁾	0,500 ^(5,7,22)	0,400 ⁽³⁾
Manglares	0,200 ⁽²³⁾	1000 ⁽²⁾	0,800 ⁽⁴⁾	0,700 ⁽⁴⁾	0,600 ⁽⁴⁾	0,200 ⁽²⁴⁾	0,600 ⁽⁴⁾
Bosques de palma	0,200 ⁽²³⁾	1000 ⁽²⁾	0,800 ⁽⁴⁾	5000 ⁽²⁴⁾	0,400 ⁽²⁴⁾	0,200 ⁽²⁴⁾	0,400 ⁽²⁴⁾
Desconocido	0,001 ⁽³⁾	1000 ⁽²⁾	0,250 ⁽³⁾	0,001 ⁽³⁾	0,050 ⁽³⁾	0,001 ⁽³⁾	0,050 ⁽³⁾
Páramo	0,008 ⁽²¹⁾	1000 ⁽²⁾	0,845 ⁽¹¹⁾	0,001 ⁽³⁾	0,400 ⁽¹⁷⁾	0,001 ⁽³⁾	0,400 ⁽¹⁷⁾
Banano	0,089 ⁽²⁵⁾	1000 ⁽²⁾	0,500 ^(26,27)	288.000 ⁽²⁸⁾	0,500 ⁽²⁹⁾	35.000 ⁽²⁸⁾	0,500 ⁽²⁹⁾
Aceite de palma	0,200 ^(30,31)	1000 ⁽²⁾	0,500 ⁽⁴⁾	82.000 ^(32,33)	0,225 ⁽⁴⁾	31.000 ^(32,33)	0,225 ⁽⁴⁾
Pastoreo (ganado bovino)	0,017 ^(1,9,21)	1000 ⁽²⁾	0,400 ^(26,27)	34.000 ^{(34)*}	0,360 ^(3,5,13)	25.000 ^{(34)*}	0,360 ^(3,5,13)
Pastoreo (Ganado lechero)	0,017 ^(1,9,21)	1000 ⁽²⁾	0,400 ^(26,27)	96.000 ^{(34)*}	0,360 ^(3,5,13)	48.000 ^{(34)*}	0,360 ^(3,5,13)
Pastoreo (fuera NAMA)	0,017 ^(1,9,21)	1000 ⁽²⁾	0,400 ^(26,27)	65.000 ^{(34)*}	0,360 ^(3,5,13)	37.000 ^{(34)*}	0,360 ^(3,5,13)
Piña	0,300 ^(30,35)	1000 ⁽²⁾	0,250 ^(26,27)	383.000 ^(36,37)	0,200 ⁽³⁸⁾	74.000 ^(36,37)	0,300 ⁽³⁸⁾
Café** (Coto-Brus)	0,030 ⁽³⁹⁾	0,606 ^(2,31)	0,500 ⁽⁴⁾	177.860 ^(40,41)	0,265 ^(3-5,13)	18.660 ^(40,41)	0,265 ^(3-5,13)
Café** (Pérez-Zeledón)	0,030 ⁽³⁹⁾	0,636 ^(2,31)	0,500 ⁽⁴⁾	187.160 ^(40,41)	0,264 ^(3-5,13)	21.960 ^(40,41)	0,264 ^(3-5,13)
Café** (Los Santos)	0,030 ⁽³⁹⁾	0,624 ^(2,31)	0,500 ⁽⁴⁾	183.440 ^(40,41)	0,264 ^(3-5,13)	20.640 ^(40,41)	0,264 ^(3-5,13)
Café** (Turrialba)	0,030 ⁽³⁹⁾	0,628 ^(2,31)	0,500 ⁽⁴⁾	184.680 ^(40,41)	0,264 ^(3-5,13)	21.080 ^(40,41)	0,264 ^(3-5,13)
Café** (Valle Central)	0,032 ⁽³⁹⁾	0,744 ^(2,31)	0,500 ⁽⁴⁾	220.640 ^(40,41)	0,260 ^(3-5,13)	33.840 ^(40,41)	0,260 ^(3-5,13)
Café** (Valle Occidental)	0,031 ⁽³⁹⁾	0,646 ^(2,31)	0,500 ⁽⁴⁾	190.260 ^(40,41)	0,263 ^(3-5,13)	23.060 ^(40,41)	0,263 ^(3-5,13)
Café** (Zona Norte)	0,030 ⁽³⁹⁾	0,604 ^(2,31)	0,500 ⁽⁴⁾	177.240 ^(40,41)	0,265 ^(3-5,13)	18.440 ^(40,41)	0,265 ^(3-5,13)
Bosque tropical de tierras bajas	0,003 ⁽²¹⁾	1000 ⁽²⁾	0,700 ⁽⁴⁾	1400 ^(42,43)	0,400 ⁽⁴⁾	0,125 ^(42,43)	0,400 ⁽⁴⁾
Bosque tropical montañoso	0,003 ⁽²¹⁾	1000 ⁽²⁾	0,650 ⁽⁴⁾	5450 ^(43,44)	0,500 ⁽⁴⁾	0,900 ^(45,46)	0,500 ⁽⁴⁾
Bosque caducifolio tropical	0,003 ⁽²¹⁾	1000 ⁽²⁾	0,670 ⁽⁴⁾	1610 ⁽⁴⁾	0,400 ⁽⁴⁾	0,125 ⁽⁴⁾	0,400 ⁽⁴⁾
Bosque tropical secundario	0,007 ⁽²¹⁾	1000 ⁽²⁾	0,600 ⁽⁴⁾	3,267 ⁽³⁻⁵⁾	0,410 ^(3-5,13)	0,171 ⁽³⁻⁵⁾	0,410 ^(3-5,13)
Bosque de plantación tropical	0,015 ^(1,9)	1000 ⁽²⁾	0,500 ⁽⁴⁾	3,267 ⁽³⁻⁵⁾	0,410 ^(3-5,13)	0,171 ⁽³⁻⁵⁾	0,410 ^(3-5,13)

() Referencias utilizadas.

* Basado en la densidad de ganado bovino de 1 cabezal bovino/ha para ganado vacuno, 1,62 cabezal/ha para productos lácteos y un promedio para pastizales fuera de la NAMA

** Promedio ponderado de indicadores de café de sol y de sombra (véase Cuadro A2 y A3 para más detalles).

Fuente: Elaboración propia basada en la siguiente bibliografía.

Referencias Cuadro A1

- Lianes, R.E. (2008). *Estudio del factor vegetación "factor C" de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada "RUSLE" en la cuenca del río Birris (Costa Rica)*. Madrid, Spain: Universidad politécnica de Madrid. Disponible en: <http://oa.upm.es/1267/>
- Vallet, A., Locatelli, B., Levrel, H., Pérez, C.B., Imbach, P., Carmona, N.E., Manlay, R., Oszwald, J. (2016). 'Dynamics of Ecosystem Services during Forest Transitions in Reventazón, Costa Rica'. *PLOS ONE* 11:e0158615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158615>
- Sharp, R., et al. (2016). *InVEST +VERSION+ User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Bhagabati, N., Barano, T., Conte, M., Ennaanay, D., Hadian, O., McKenzie, E., Olwero, N., Rosenthal, A., Suparmoko, Shapiro, A., Tallis, H. and Wolny, S. (2012). *A green vision for Sumatra. Using ecosystem services*

- information to make recommendations for sustainable land use planning at the province and district level. A Report by The Natural Capital Project, WWF-US, and WWF-Indonesia. The Natural Capital Project, Stanford University, USA. Disponible en: <https://woods.stanford.edu/sites/default/files/files/GreenVision.pdf>
5. Leh, M.D.K., Matlock, M.D., Cummings, E.C., Nalley, L.L. (2013). 'Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa'. *Agric. Ecosyst. Environ.* 165:6–18. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.12.001>
 6. Rast, W., Lee, G.F. (1983). 'Nutrient Loading Estimates for Lakes'. *J. Environ. Eng.* 109:502–517. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1983\)109:2\(502\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1983)109:2(502))
 7. Jeje, Y. (2006). 'Export coefficients for total phosphorus, total nitrogen and total suspended solids in the southern Alberta region'. *Alberta Environment and Sustainable Resource Development*, Alberta, Canada. Disponible en: ftp://www.csc.noaa.gov/pub/crs/OpenNSPECT/Coefficients/Coefficients_lit_review.pdf
 8. Lin, J.P. (2004). *Review of Published Export Coefficient and Event Mean Concentration (EMC) Data*. Vicksburg, USA: Army Engineer Research and Development Center. Disponible en: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/199085#page/6/mode/1up>
 9. Burke, L., and Sugg, Z. (2006). *Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*. Washington, USA: World Resources Institute. Disponible en: https://www.wri.org/sites/default/files/pdf/mar_hydrologic_model_results_spanish.pdf
 10. Campos Vargas, C.A. (2010). *Análisis de los cambios de cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, periodo 2000-2010*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica-Escuela de ingeniería forestal. Disponible en: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr/xmlui/handle/2238/3002>
 11. Vogl, A. and Wolny, S. (2015). *Developing cost-effective investment portfolios for the Upper Tana-Nairobi Water Fund, Kenya*. USA: The Natural Capital Project, Stanford University. Disponible en: <http://www.nature.org/ourinitiatives/regions/africa/rios-technical-appendix.pdf>
 12. Kelsey, P. (2010). *Nutrient-export modelling of the Leschenault catchment. Report No.: 11*. Western Australia, Australia: Department of Water.
 13. Fu, B., Wang, Y.K., Xu, P., Yan, K. (2012). 'Modelling nutrient retention function of ecosystem – a case study in Baoxing County, China'. *Procedia Environ. Sci., 18th Biennial ISEM Conference on Ecological Modelling for Global Change and Coupled Human and Natural System* 13:111–121. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.011>
 14. Beaulac, Michael N., K.H.R. (1982). 'An examination of land use-nutrient export relationships'. *Water Resour. Bull.* 18:1013–1024.
 15. Neill, C., Piccolo, M.C., Cerri, C.C., Steudler, P.A., Melillo, J.M. (2006). 'Soil solution nitrogen losses during clearing of lowland Amazon forest for pasture'. *Plant and Soil* 281:233–245.
 16. Ruppenthal, M., Leihner, D.E., Steinmuller, N., & M.A. El-Sharkawy. (1997). 'Losses of organic matter and nutrients by water erosion in cassava-based cropping system'. *Expl. Agric.* 33:487-498.
 17. de Koning, G.H.J., van de Kop, P.J., Fresco, L.O. (1997). 'Estimates of sub-national nutrient balances as sustainability indicators for agro-ecosystems in Ecuador'. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 65:127–139.
 18. Gines, O.R. (1998). 'Total phosphorus and total nitrogen mass balances for Lago de Cidra, Central Puerto Rico'. American Water Resources Association Conference Proceedings.
 19. Wilcke, W., Lilienfein, J. (2005). 'Nutrient leaching in oxisols under native and managed vegetation in Brazil'. *Journal of the Soil Science Society of America* 69:1152-1161.
 20. Kwong, K.F.N.K., Bholah, A., Voley, L., Pynee, K. (2002). 'Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius'. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91: 147-157.
 21. Lianes, E., Marchamalo, M., Roldán, M. (2009). 'Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birris, Costa Rica'. *Agron. Costarricense* 33:217–235. http://www.mag.go.cr/rev_agr/v33n02_217.pdf
 22. Johnes, P.J. (1996). 'Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach'. *J. Hydrol.* 183: 323–349. [https://doi.org/doi:10.1016/0022-1694\(95\)02951-6](https://doi.org/doi:10.1016/0022-1694(95)02951-6)
 23. Ministry of Natural Resources and Environment Malaysia. (2010). 'Preparation of Design Guides for Erosion and Sediment Control in Malaysia. Final Report'. Kuala Lumpur, Malaysia: Ministry of Natural Resources and Environment Malaysia.
 24. McDowell, W.H., Asbury, C.E. (1994). 'Export of carbon, nitrogen and major ions from three tropical montane watersheds'. *Limnology and Oceanography* 39:111-125.
 25. Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K., Weesies, G.A. (2003). 'Soil erosion prediction using

- RUSLE for central Kenyan highland conditions'. *Agric. Ecosyst. Environ.* 97:295–308. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00011-2)
26. Liu, X., Zhang, X., Zhang, M. (2008). 'Major factors influencing the efficacy of vegetated buffers on sediment trapping: a review and analysis'. *J. Environ. Qual* 37:1667–1674. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0437>
 27. Zhang, X., Liu, X., Zhang, M., Dahlgren, R.A., Eitzel, M. (2010). 'A review of vegetated buffers and a meta-analysis of their mitigation efficacy in reducing nonpoint source pollution'. *J. Environ. Qual* 39:76–84. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0496>
 28. Lopez, A. and Espinosa, J. (2000). *Manual on the Nutrition and Fertilization of Banana*. Limón, Costa Rica: Corporación Bananera Nacional.
 29. Bertsch, F. (1995). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
 30. Pacheco, H., Marcano, A. and Cartaya, S. (2014). 'Cálculo del factor C de la USLE, en la cuenca del río Carache, Trujillo Venezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1'. XVI Simposio Internacional SELPER. La Geoinformación al servicio de la sociedad. Medellín, Colombia. 29 de Septiembre al 3 de Octubre. Disponible en: <http://selper.org.co/papers-XVI-Simposio/Cartografia-Digital/CD5-Factor-C-de-la-USLE.pdf>
 31. Kuok, K.K.K., Mah, D.Y.S., Chiu, P.C. (2013). 'Evaluation of C and P Factors in Universal Soil Loss Equation on Trapping Sediment: Case Study of Santubong River'. *J. Water Resour. and Prot.* 05:1149–1154. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.512121>
 32. Sáenz Mejía, L.E. (2006). *Cultivo de la Palma Africana Guía Técnica*. Managua, Nicaragua: IICA. Disponible en: https://www.academia.edu/28048811/CULTIVO_DE_LA_PALMA_AFRICANA_GU%C3%8DA_T%C3%89CNICA
 33. Quesada Herrera, G. (2002). Cultivo e Industria de la Palma Aceitera (*Elaeis guineensis*). San José, Costa Rica: Ministry of Agriculture. Disponible en: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec_palma.pdf
 34. Pastos: Gilberto Cabalceta (1999). 'Fertilización y Nutrición de Forrajes de altura'. XI Congreso Nacional Agronómico / III Congreso Nacional de Suelos. San José, Costa Rica 19 to 23 July. Disponible en: http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_239.pdf
 35. Nill, D., Schwertmann, U., Sabel-Koschella, U., Bernhard, M. and Breuer, J. (1996). *Soil Erosion by Water in Africa*. Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Disponible en: http://agriwaterpedia.info/images/3/33/Soil_Erosion_by_Water_in_Africa.pdf
 36. Ingwersen, W.W. (2012). 'Life cycle assessment of fresh pineapple from Costa Rica'. *J. Clean. Prod.* 35:152–163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.035>
 37. Ministry of Agriculture and Livestock (1991). *Aspectos técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica*. Dirección general de Investigación y Extensión Agrícola. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658.pdf>
 38. Ministry of Agriculture and Livestock (2010). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para la Producción de Piña (Ananas Comosus L.)*. San José, Costa Rica: Ministry of Agriculture and Livestock. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00184.pdf>
 39. Hoyos, N. (2005). 'Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes'. *CATENA* 63:85–108. doi:10.1016/j.catena.2005.05.012
 40. Tully, K.L., Lawrence, D., Scanlon, T.M. (2012). 'More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests'. *Agric. Ecosyst. Environ.* 161:137–144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.08.002>
 41. Tully, K.L., Wood, S.A., Lawrence, D. (2013). 'Fertilizer type and species composition affect leachate nutrient concentrations in coffee agroecosystems'. *Agrofor. Syst.* 87:1083–1100. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9622-0>
 42. Parker, G.G. (1985). 'The effect of disturbance on water and solute budgets of hillside tropical rainforest in northeastern Costa Rica'. PhD Thesis, Athens, USA: University of Georgia.
 43. Bruijnzeel, L.A. (1991). 'Nutrient Input-Output Budgets of Tropical Forest Ecosystems: A Review'. *J. Trop. Ecol.* 7:1–24.
 44. Lugo, A.E. (1986). *Water and the ecosystems of the Luquillo experimental forest. General Technical Report SO-63*. Rio Piedras, Puerto Rico: Institute of Tropical Forestry.
 45. P: Jordan, C.F. (1969). 'Isotope cycles'. In: Jordan, C.F. and Drwery, G.E. (Eds.). *The rain forest project annual report*, pp. 1-17. San Juan, Puerto Rico: Puerto Rico Nuclear Center.
 46. Edmisten, J.A. (1970). 'Preliminary studies of the nitrogen budget of a tropical rain forest'. In: Odum, H.T. and Pigeon, R.F. (Eds.). *A tropical rainforest*, pp. 211-215. U.S. Oak Ridge, Tennessee: Atomic Energy Commission.

Cálculos de variables biofísicas de café por región

Cuadro A2: Indicadores de café de sol y sombra

	Factor C	Factor P	Eficiencia retención sedimento	Carga N	Eficiencia retención N	Carga P	Eficiencia retención P
Café (sol)	0,035 ⁽¹⁾	1000 ⁽²⁾	0,50 ⁽³⁾	300 ^(4,5)	0,250 ⁽³⁾	62 ^(4,5)	0,250 ⁽³⁾
Café (sombra)	0,030 ⁽¹⁾	0,600 ⁽⁶⁾	0,50 ⁽³⁾	176 ^(4,5)	0,265 ^(3,7-9)	18 ^(4,5)	0,265 ^(3,7-9)

() Referencias utilizadas.

Fuente: Elaboración propia basada en la siguiente bibliografía.

Referencias Cuadro A2

- Hoyos, N. (2005). 'Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes'. *CATENA* 63:85–108. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.012>
- Vallet, A., Locatelli, B., Levrel, H., Pérez, C.B., Imbach, P., Carmona, N.E., Manlay, R., Oszwald, J. (2016). 'Dynamics of Ecosystem Services during Forest Transitions in Reventazón, Costa Rica'. *PLOS ONE* 11:e0158615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158615> <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371%2Fjournal.pone.0158615>
- Bhagabati, N., Barano, T., Conte, M., Ennaanay, D., Hadian, O., McKenzie, E., Olwero, N., Rosenthal, A., Suparmoko, Shapiro, A., Tallis, H. and Wolny, S. (2012). *A green vision for Sumatra. Using ecosystem services information to make recommendations for sustainable land use planning at the province and district level. A Report by The Natural Capital Project, WWF-US, and WWF-Indonesia*. USA: The Natural Capital Project, Stanford University. Disponible en: <https://woodsinsitute.stanford.edu/system/files/publications/GreenVision.pdf>
- Tully, K.L., Lawrence, D., Scanlon, T.M. (2012). 'More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests'. *Agric. Ecosyst. Environ.* 161:137–144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.08.002>
- Tully, K.L., Wood, S.A., Lawrence, D. (2013). 'Fertilizer type and species composition affect leachate nutrient concentrations in coffee agroecosystems'. *Agrofor. Syst.* 87:1083–1100. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9622-0>
- Kuok, K.K.K., Mah, D.Y.S., Chiu, P.C. (2013). 'Evaluation of C and P Factors in Universal Soil Loss Equation on Trapping Sediment: Case Study of Santubong River'. *J. Water Resour. And Prot.* 05:1149–1154. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.512121>
- Sharp, R., et al. (2016). *InVEST +VERSION+ User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Leh, M.D.K., Matlock, M.D., Cummings, E.C., Nalley, L.L. (2013). 'Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa'. *Agric. Ecosyst. Environ.* 165:6–18. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.12.001>
- Fu, B., Wang, Y.K., Xu, P., Yan, K. (2012). 'Modelling nutrient retention function of ecosystem – a case study in Baoxing County, China'. *Procedia Environ. Sci., 18th Biennial ISEM Conference on Ecological Modelling for Global Change and Coupled Human and Natural System* 13:111–121. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.011>

Cuadro A3 Regiones considerados para café y porcentajes de café de sol y de sombra

Regiones de café	% café de sol ^a	% café de sombra ^a
Coto-Brus	1,5	98,5
Pérez-Zeledón	9,0	91,0
Los Santos	6,0	94,0
Turrialba	7,0	93,0
Valle Central	36,0	64,0
Valle Occidental	11,5	88,5
Zona Norte	1,0	99,0

^a Basado en el promedio de datos 2001 y datos parciales 2015 (Arrieta Bolaños et al., 2015).

Fuente: Elaboración propia basada en la siguiente bibliografía.

Referencias Cuadro A3

1. Arrieta Bolaños, S., Virginio Filho, E., Rapidel, B. y Roupsard, O. (2015). *Diseño de Piloto de Sistemas Agroforestales en el ámbito de la NAMA-CAFÉ Costa Rica. Caracterización cualitativa (tipología) y algunas estimaciones cuantitativas de los SAF en cada una de las 8 regiones cafetaleras del país.*

Cuadro A4 Variables biofísicos de InVEST, restauró los usos de la tierra para los modelos NDR y SDR

Uso de tierra	Factor C	Factor P	Eficiencia de retención de sedimento	Carga N	Eficiencia de retención N	Carga P	Eficiencia de retención P
Banano	0,0890	1,0	0,500	230.000 ^{a (1-6)}	0,500	28.000 ^{a (1-6)}	0,500
Aceite de palma	0,2000	1,0	0,500	66.000 ^{a (1-6)}	0,225	25.000 ^{a (1-6)}	0,225
Silvopastoril (carne)	0,0168 ^b	0,8 ⁽⁷⁾	0,412 ^b	109.000 ^c	0,366 ^b	50.000 ^c	0,366 ^b
Enriquecimiento y regeneración natural (en pastos anteriores)	0,0070 ⁽⁸⁾	1,0 ⁽⁹⁾	0,600 ⁽⁷⁾	3267 ⁽¹⁰⁻¹²⁾	0,410 ⁽¹⁰⁻¹³⁾	0,171 ⁽¹⁰⁻¹²⁾	0,410 ⁽¹⁰⁻¹³⁾
Silvopastoril (leche)	0,0168 ^b	0,8 ⁽⁷⁾	0,408 ^b	96.000	0,364 ^b	48.000	0,364 ^b
Piña	0,2000 ⁽¹⁴⁾	0,6 ⁽¹⁵⁾	0,250	322.000 ⁽¹⁶⁾	0,200	69.000 ⁽¹⁶⁾	0,300
Bosque ribereño	0,0070 ⁽⁸⁾	0,6 ⁽¹⁷⁾	0,600 ⁽¹⁰⁾	3267 ⁽¹⁰⁻¹²⁾	0,410 ⁽¹⁰⁻¹³⁾	0,171 ⁽¹⁰⁻¹²⁾	0,410 ⁽¹⁰⁻¹³⁾
Café (sombra)	0,0300 ⁽¹⁸⁾	0,6 ⁽¹⁵⁾	0,500 ⁽¹⁰⁾	140.800 ^{a (1-6,19,20)}	0,265 ⁽¹⁰⁻¹³⁾	14.400 ^{a (1-6,19,20)}	0,265 ⁽¹⁰⁻¹³⁾
Plantación bosque tropical	0,0150 ^(21,22)	1,0 ⁽⁹⁾	0,500 ⁽¹⁰⁾	3267 ⁽¹⁰⁻¹²⁾	0,410 ⁽¹⁰⁻¹³⁾	0,171 ⁽¹⁰⁻¹²⁾	0,410 ⁽¹⁰⁻¹³⁾

() Referencias utilizadas.

^a Liberación lenta entre 20 a 60% menos de fertilizante. Basándose en una estimación conservadora de reducción del 20% en el uso de fertilizantes.

^b Promedios ponderados. Véase los cálculos de los sistemas silvopastoriles en la Cuadro A5.

^c Basado en un aumento de la densidad a 2 cabezas de ganado por hectárea y una aplicación de 50 kg de N y 7 kg de P por año para el mantenimiento de pasturas.

Fuente: Elaboración propia basada en la siguiente bibliografía.

Referencias Cuadro A4

- Bah, A., Husni, M.H.A., Teh, C.B.S., Rafii, M.Y., Syed Omar, S.R., Ahmed, O.H. (2014). 'Reducing Runoff Loss of Applied Nutrients in Oil Palm Cultivation Using Controlled-Release Fertilizers'. *Adv. Agric.* 2014:e285387. <https://doi.org/doi:10.1155/2014/285387>
- Broschat, T.K. (1995). 'Nitrate, Phosphate, and Potassium Leaching from Container-grown Plants Fertilized by Several Methods'. *HortScience* 30:74-77
- Gutiérrez, E.G., Muñoz, M.J. (2010). 'Evaluación de tres sistemas de producción de almácigos de café (Coffea arabica) var. Caturra'. (B.S. thesis). Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2012.
- Ronen, E. (2010). 'Nuevas tecnologías de fertilización de la palma de aceite'. *Rev. Palmas* 31:191-204.
- Tang, M.K., Nazeeb, M., Loong, S.G. (2000). 'Revisión sobre los tipos de fertilizantes y métodos de aplicación en las plantaciones de palma de aceite malasias'. *Rev. Palmas* 21:73-89.
- Trenkel, M.E. (2010). *Slow -and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture*. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA).
- Aguilar de Consolin, V. (2014). 'Proyección de Pérdida del Suelo en la Cuenca del Río Jiboa, utilizando el método RUSLE/USLE aplicado en GIS'. Conferencia regional de adaptación al cambio climático y gestión preventiva del riesgo para la infraestructura pública "avanzando hacia la resiliencia". 4-5 December, San Salvador, El Salvador.
- Lianes, E., Marchamalo, M., Roldán, M. (2009). 'Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birris, Costa Rica'. *Agron. Costarricense*. 33:217-235. http://www.mag.go.cr/rev_agr/v33n02_217.pdf
- Vallet, A., Locatelli, B., Levrel, H., Pérez, C.B., Imbach, P., Carmona, N.E., Manlay, R., Oszwald, J. (2016). 'Dynamics of Ecosystem Services during Forest Transitions in Reventazón, Costa Rica'. *PLOS ONE* 11:e0158615. <https://doi.org/doi:10.1371/journal.pone.0158615> <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371%2Fjournal.pone.0158615>
- Bhagabati, N., Barano, T., Conte, M., Ennaanay, D., Hadian, O., McKenzie, E., Olwero, N., Rosenthal, A., Suparmoko, Shapiro, A., Tallis, H. and Wolny, S. (2012). *A green vision for Sumatra. Using ecosystem services information to make recommendations for sustainable land use planning at the province and district level. A Report by The Natural Capital Project, WWF-US, and WWF-Indonesia*. USA: The Natural Capital Project, Stanford University. Disponible en: <https://woods.stanford.edu/sites/default/files/files/GreenVision.pdf>
- Sharp, R., et al. (2016). *InVEST +VERSION+ User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Leh, M.D.K., Matlock, M.D., Cummings, E.C., Nalley, L.L. (2013). 'Quantifying and mapping multiple

- ecosystem services change in West Africa'. *Agric. Ecosyst. Environ.* 165:6–18. <https://doi.org/doi:10.1016/j.agee.2012.12.001>
13. Fu, B., Wang, Y.K., Xu, P., Yan, K. (2012). 'Modelling nutrient retention function of ecosystem – a case study in Baoxing County, China'. *Procedia Environ. Sci., 18th Biennial ISEM Conference on Ecological Modelling for Global Change and Coupled Human and Natural System* 13:111–121. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.011>
 14. Nill, D., Schwertmann, U., Sabel-Koschella, U., Bernhard, M. and Breuer, J. (1996). Soil Erosion by water in Africa. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, Germany. Disponible en: http://agriwaterpedia.info/images/3/33/Soil_Erosion_by_Water_in_Africa.pdf
 15. Kuok, K.K.K., Mah, D.Y.S., Chiu, P.C. (2013). 'Evaluation of C and P Factors in Universal Soil Loss Equation on Trapping Sediment: Case Study of Santubong River'. *J. Water Resour. and Prot.* 05:1149–1154. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.512121>
 16. Saucedo, S.F. (2007). *Uso de los microorganismos eficaces en y la vinaza como potencializadores de microorganismos biotransformadores de residuos de cosecha y fijadores de nitrógeno en el cultivo de la caña de azúcar*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
 17. Wang, X., Kannan, N., Santhi, C., Potter, S.R., Williams, J.R. and Arnold, J.G. (2011). Integrating APEX output for cultivated cropland with SWAT simulation for regional modeling. *Transactions of the ASABE* 54:1281-1298.
 18. Hoyos, N. (2005). 'Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes'. *CATENA* 63:85–108. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.012>
 19. Tully, K.L., Lawrence, D., Scanlon, T.M. (2012). 'More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests'. *Agric. Ecosyst. Environ.* 161:137–144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.08.002>
 20. Tully, K.L., Wood, S.A., Lawrence, D. (2013). 'Fertilizer type and species composition affect leachate nutrient concentrations in coffee agroecosystems'. *Agrofor. Syst.* 87:1083–1100. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9622-0>
 21. Lianes, R. E. (2008). *Estudio del factor vegetación "factor C" de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada "RUSLE" en la cuenca del río Birrís (Costa Rica)*. Madrid, Spain: Universidad politécnica de Madrid. Disponible en: https://oa.upm.es/1267/1/PFC_ELENA_LIANES_REVILLA.pdf
 22. Burke, L., and Sugg, Z. (2006). *Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano*. Washington, USA: World Resources Institute. Disponible en: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADI182.pdf

Cuadro A5 Indicadores de pasturas y plantación forestal y peso en promedio ponderado (pastura y plantación)

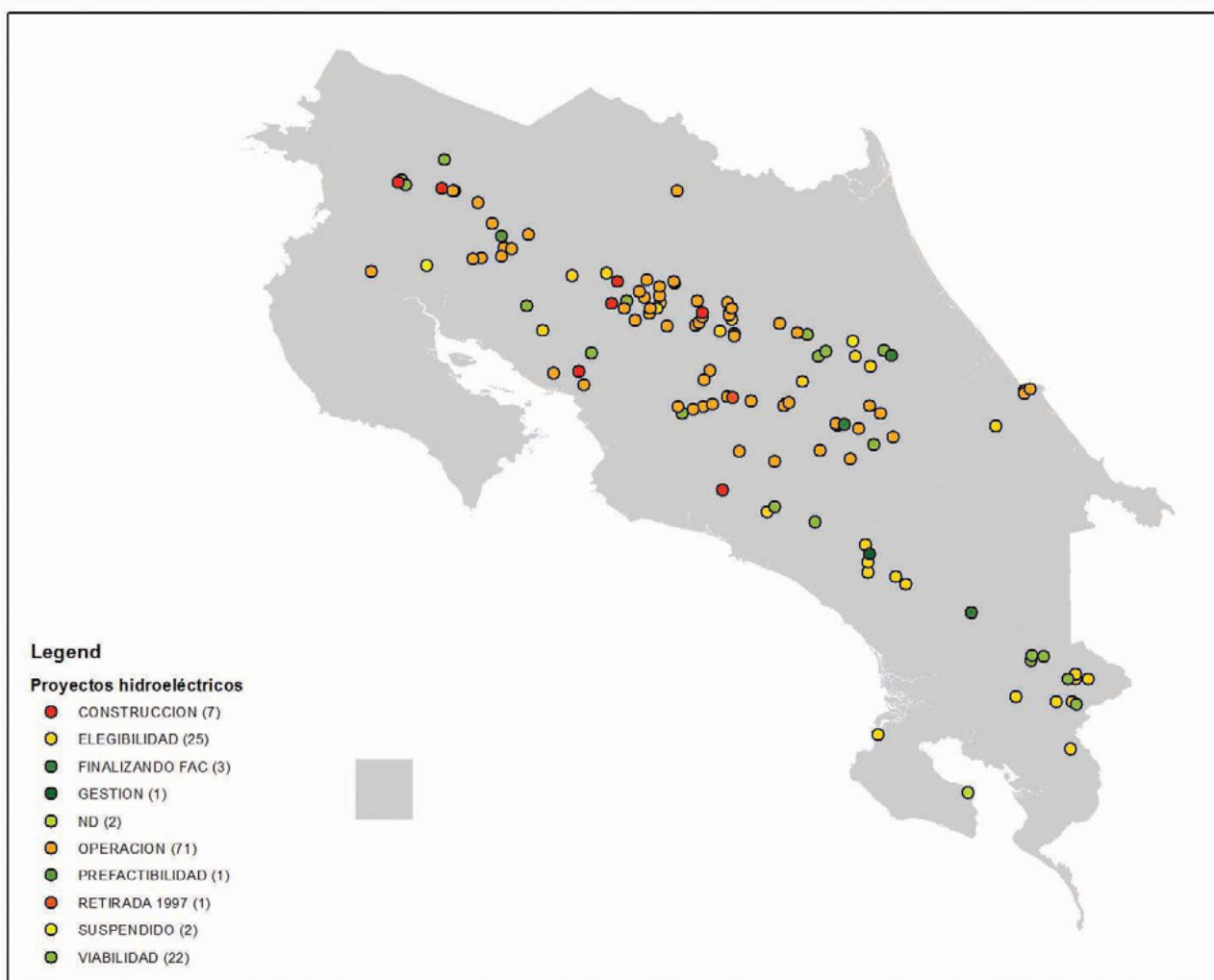
	Peso	Factor C	Eficiencia retención sedimento	Eficiencia retención de nitrógeno	Eficiencia retención de fósforo
Pasto (ganado de carne) ^a	0,882	0,017	0,400	0,360	0,360
Plantaciones forestales tropicales en pastos para carne de res ^a	0,117	0,015	0,500	0,410	0,410
Pasto (ganado lechero) ^b	0,920	0,017	0,400	0,360	0,360
Plantaciones forestales tropicales en pasturas para productos lácteos ^b	0,080	0,015	0,500	0,410	0,410

^a En el caso de los pastos de ganado vacuno se asumieron parcelas de 5000 m². Por lo tanto, la cerca viva tiene una longitud de 500 m. Basado en los criterios de tres expertos, considerando la poda anual y una distancia de plantación de 2 metros, se asume que hay 1,3 metros de sombra lineal de los árboles en los pastos, proporcionando 650 m² de sombra. Además, los pastos contienen 30 árboles/ha plantados. El modelo silvopastoril propuesto consta de 21 árboles de troncos estrechos y nueve árboles de sombra. Los árboles de madera tienen un ancho de corona de 2 m, proporcionando un total de 260 m² de sombra, mientras que los árboles de sombra tienen una corona de 3 m en promedio, proporcionando sombra en 260 m² de pastos. La cobertura total proporcionada por los árboles es así alrededor de 1170 m² o el 11,7%.

^b En el caso de pasturas para ganado lechero, el modelo silvopastoril propuesto consistió en parcelas con un tamaño de 2500 m² y una valla viva de 600 m. Considerando 1,3 m de sombra lineal, el área de pasto total cubierta por sombra será de alrededor del 8%.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3



Mapa A1 Localización de plantas para la producción hidroeléctrica en operación y en diversas etapas de planificación y construcción.

Fuente: Ortiz-Malavassi, E., 2009. Atlas Digital de Costa Rica 2008.

Anexo 4

Cuadro A6 Margen de error de optimización ROOT

Uso	Priorización	Numero de hexagonales	Valor	Área por fuera (ha)	Área bajo meta (ha)	Área meta original (ha)	Error (%)
BPA banano	Biofísico	5	52,56	10,21	6244,28	6250	0,16
	Servicios	11	51,00	44,38	6163,16	6250	0,71
	Corredor	6	53,00	10,44	6248,84	6250	0,17
Sistema silvopastoril en pasto para ganado lechero (pastos > 1000 m)	Biofísico	10	51,00	20,88	99.992,80	100.000	0,02
	Servicios	71	49,00	59,90	99.998,67	100.000	0,06
	Corredor	1	52,00	110,40	99.902,10	100.000	0,11
Regeneración natural	Biofísico	0	51,00	0,00	100.000,00	100.000	0,00
	Servicios	1	50,17	15,03	99.970,80	100.000	0,02
	Corredor	81	46,00	188,56	99.968,10	100.000	0,19
SSP en pasto para ganado de carne aptitud agrícola	Biofísico	5	63,00	292,45	254.948,34	255.000	0,11
	Servicios	58	48,00	418,92	254.858,29	255.000	0,16
	Corredor	55	49,84	128,45	254.974,00	255.000	0,05
Reforestación en pastos fuera de la NAMA Ganadería	Biofísico	130	50,00	375,39	69.873,90	70.000	0,53
	Servicios	94	46,00	169,73	69.992,00	70.000	0,24
	Corredor	239	45,00	186,25	69.995,58	70.000	0,27
BPA palma de aceite	Biofísico	1	29,88	378,33	6243,84	6250	5,71
	Servicios	1	51,32	324,28	5941,48	6250	5,18
	Corredor	6	47,49	183,04	6111,79	6250	2,91
NAMA Café	Biofísico	3	25,45	321,59	24.906,12	25.000	1,27
	Servicios	16	45,00	270,12	24.845,87	25.000	1,08
	Corredor	21	49,00	4,63	24.999,53	25.000	0,02
Restauración de bosques de galería con banano, piña y palma de aceite	Biofísico	33	51,00	5,46	6249,94	6250	0,09
	Servicios	7	51,95	14,63	6249,73	6250	0,23
	Corredor	47	50,12	17,73	6249,78	6250	0,28
BPA con piña	Biofísico	2	50,06	23,85	6247,31	6250	0,38
	Servicios	2	48,00	122,06	6180,51	6250	1,94
	Corredor	3	53,00	45,81	6224,44	6250	0,73

Fuente: Elaboracion propia.



**UNIÓN INTERNACIONAL
PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**

Oficina Regional para México, América Central y El Caribe
Apdo. 607-2050
Montes de Oca, San José,
San José, Costa Rica
Tel: (506) 2283-8449
ormacc@iucn.org
www.iucn.org/ormacc
www.iucn.org/resources/publications