

CAPÍTULO

4

ARMONÍA CON LA NATURALEZA

Herramientas para el análisis y el enfoque territorial de las políticas forestales en Costa Rica

HALLAZGOS RELEVANTES

- Entre 1986 y 2019, el país enfrentó procesos iniciales de pérdida de cobertura forestal, seguidos de una importante recuperación. Ese tipo de uso se mantuvo como predominante en todo el período.
- En ese mismo período, el 52,3% del área que dejó de ser cobertura forestal fue utilizada para pastos, aunque también las áreas dedicadas a pastos fueron las que cedieron espacio a la cobertura forestal recuperada.
- En 2019, un 24,6% del área de pastos y un 25,7% del área de cultivos provino de terrenos que eran cobertura forestal en el 2014. Esto podría indicar un retorno de las presiones que se habían registrado en otras épocas. Además, aunque la sustitución por mancha urbana disminuyó en el período 1986-2019, entre 2014 y 2019 se evidenció una tasa de crecimiento del 80,4%.
- Desde 1986 el país perdió depósitos de carbono, pero recuperó una parte posteriormente. La mayor pérdida se dio en el período comprendido entre 1986 y 1992 (-4,8%). El nivel más bajo se alcanzó en el 2001, pero, luego se fue recuperando hasta el 2019. Sin embargo, cabe mencionar que no fue posible conseguir, en ese último año, los niveles de *stock* de carbono existentes a finales de la década de los ochenta.
- Entre 1986 y 2019, las áreas de conservación La Amistad Caribe y Central acumularon la mayor parte de los depósitos forestales de carbono y del potencial de mitigación del cambio climático en el ámbito forestal (20,7% y 17,9%, en promedio, respectivamente).
- Aunque las áreas silvestres protegidas (ASP) representan el 25,5% del territorio continental, albergaron, en promedio, el 40,7% de los depósitos de carbono del período 1986-2019. No obstante, los bosques externos a las ASP aportaron la mayor parte del *stock* de carbono, aunque mostraron una menor estabilidad en el tiempo.
- La sustitución de bosques por pastos fue la causa principal de las emisiones provocadas por la deforestación entre 1986 y 2019 (70,9%).
- Desde 2002 el sector forestal exhibe un balance positivo como sumidero de carbono. Lo anterior es resultado, principalmente, de la reducción de emisiones causadas por la deforestación, pasaron de 13 millones a 1,1 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2019.
- Según un ejercicio de predicción con aprendizaje automático, Costa Rica perdería 515 kilómetros cuadrados de cobertura arbórea para el 2025, un 1,4% de la existente en la actualidad. La zona norte es la región que tendría la mayor pérdida (2,1%).
- Las zonas con mayor riesgo de perder cobertura arbórea se caracterizan por tener aptitud para uso agropecuario, pendientes bajas y presencia cercana de cultivos y pastos. Además, los precios de la tierra son más bajos en ellas, hay mejor acceso por vías terrestres y los distritos poseen un bajo nivel de desarrollo. El riesgo es menor cuando la cobertura arbórea se ubica dentro de áreas protegidas, corredores biológicos, franjas de protección de ríos o zonas costeras.

NUEVOS APORTES PARA LA TOMA DE DECISIONES

- Información satelital permitió realizar un análisis global del cambio operado en el uso del suelo en Costa Rica entre 1986 y 2019. Esto posibilitó el estudio de los patrones temporales y espaciales de esos cambios, para explicar y abordar las presiones de la actividad humana sobre los ecosistemas, así como las tendencias positivas que favorecieron la recuperación de cobertura forestal en el país. También facilitó la identificación de presiones recientes que ponían en riesgo ese logro.
- Gracias a una combinación de fuentes oficiales con referencias documentales, se presenta un análisis inédito sobre los patrones temporales y espaciales de los depósitos de carbono en Costa Rica. Se estiman, además, las emisiones por deforestación o cambio de cobertura forestal. Los hallazgos permiten enfocar territorialmente los resultados que ha tenido el país en sumideros de carbono, así como ubicar objetivos precisos para proteger y mejorar el potencial de mitigación del cambio climático desde la perspectiva de la política forestal.
- Por primera vez en este Informe, se aplica un ejercicio de predicción a partir del aprendizaje automático (*machine learning*) desde la perspectiva ambiental. Se generó una herramienta que predice la probabilidad de pérdida de la cobertura arbórea en el corto plazo (2021-2025). El análisis explica parte de la pérdida que ha ocurrido en el pasado, con visión territorial, y a partir de ello permite identificar con precisión de 30 por 30 metros, los lugares que presentan mayor riesgo en el territorio y sus características.

CAPÍTULO

ARMONÍA CON LA NATURALEZA

4

/ Herramientas para el análisis y el enfoque territorial de las políticas forestales en Costa Rica

INDICE		Introducción
Hallazgos relevantes	177	El <i>Informe Estado de la Nación</i> , en sus más recientes ediciones, ha identificado paradojas que marcan la gestión ambiental de Costa Rica. Una de ellas es la coexistencia de logros históricos en materia de conservación al lado de patrones persistentes e insostenibles en el uso del territorio y de los recursos naturales. Estos han sido estudiados a profundidad en los últimos años, desde la perspectiva del desarrollo humano.
Nuevos aportes para la discusión	177	
Introducción	179	
Contexto: caracterización del cambio en los usos del suelo entre 1986 y 2019	180	En esta entrega, el objeto de análisis se traslada hacia las áreas de mayor fortaleza, pues Costa Rica las ha impulsado de manera significativa y ha obtenido logros claros en las últimas tres décadas. Desde los años noventa, se aprobó una normativa novedosa e integradora, se crearon instituciones ambientales y se pusieron en marcha instrumentos creativos para la protección y recuperación de la cobertura forestal. Todo ha sido producto de la conjunción entre iniciativas públicas, participación privada y de la sociedad civil, así como esquemas diversos de manejo y gestión de ecosistemas y territorios. Como resultado, el país experimentó una recuperación importante de su trama verde, se posicionó como un destino turístico ecológico y, también, se constituyó en referente de los espacios políticos internacionales en la materia. A pesar de que internamente los desafíos son profundos y la situación es grave en muchas agendas, es innegable que, comparativamente, se obtuvo un reconocimiento en torno de los avances alcanzados en conservación.
La cobertura forestal superó procesos de pérdida y se mantuvo como predominante	180	
Pastos y cultivos presionaron la cobertura forestal a inicios del período	183	
Cobertura forestal “robó” territorio a pastos y cultivos	187	Como es de esperar, se han enfrentado presiones diversas y fuertes -estructurales o coyunturales- que generan amenazas
Depósitos forestales de carbono: patrones temporales y espaciales (1986-2019)	189	para la cobertura forestal; por lo tanto, es imperativo cuidar lo que se ha construido y, ante todo, definir políticas informadas y precisas que contrarresten los riesgos. El contexto actual, marcado por la pandemia causada por el covid-19 y la profunda crisis que ha generado, se ha convertido en un caldo de cultivo para el retorno de discursos anti-ambientales, y la generación de nuevas tensiones que favorecen el descuido o el uso no sostenible de los recursos naturales protegidos o de la cobertura recuperada.
Stock de carbono tiene más presencia pero mayor vulnerabilidad en zonas no protegidas	190	Las “Miradas a profundidad” de este Informe enfatizan en aspectos que han sido estudiados, aprovechan nuevas fuentes y metodologías, y crean instrumentos de investigación aplicada, con el propósito de enriquecer el debate y apoyar la toma de decisiones. En este capítulo se integran herramientas para el análisis y el enfoque territorial de las políticas forestales en Costa Rica, porque permiten comprender mejor los procesos que han conducido a un resultado positivo, así como los riesgos que se enfrentan. Lo anterior ha sido posible a partir de datos que identifican objetos de política pública tendentes a evitar
Emisiones y remociones de carbono por cambios en uso forestal: balance positivo, pero con presiones	195	
Predicción de pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica entre 2021-2025	201	
Costa Rica perdería un 1,4% de su cobertura arbórea en el 2025	201	
Pérdida estimada de cobertura arbórea varía según región hidrológica	203	
Historial de cambios de uso explica la mayoría del riesgo de pérdida de cobertura arbórea	211	
Menor desarrollo social, ausencia de esquemas de resguardo y presiones agropecuarias caracterizan las zonas más propensas a perder la cobertura arbórea	212	
Conclusiones	213	

la deforestación, así como a proteger y aumentar el potencial de mitigación forestal del cambio climático.

El capítulo se estructura en tres secciones, cada una deriva de una investigación inédita realizada para esta edición. La primera consiste en un análisis del intercambio que se genera entre grandes tipos de uso del suelo durante el período 1986-2019, y que permite observarlo con visión territorial y temporal. La segunda parte presenta un estudio sobre los patrones temporales y espaciales de los depósitos forestales de carbono en el mismo lapso, además de una estimación de las emisiones generadas por la pérdida de cobertura forestal o la deforestación. Por último, se expone un ejercicio de predicción con aprendizaje automático (*machine learning*) que estima la probabilidad de perder cobertura arbórea en el corto plazo (2021-2025), y caracteriza las zonas más vulnerables.

Es importante considerar que se trata de investigaciones que, por su naturaleza, no utilizan la misma fuente, series de tiempo ni metodologías. Esta decisión se tomó en concordancia con los objetivos propios de cada estudio, que requieren datos específicos para realizar análisis diferenciados entre sí. Por esa razón los principales aspectos metodológicos se resumen en cada sección y se incluye, al final del capítulo, un Anexo Metodológico más detallado sobre los procedimientos seguidos en cada caso.

Contexto: caracterización del cambio en los usos del suelo entre 1986 y 2019

En esta primera sección se presenta un análisis sobre el uso del suelo en el país, con énfasis en los cambios históricos recientes, relacionados con la cobertura forestal y con sus patrones en el lapso 1986-2019. Se describen los cambios que se produjeron en el uso del territorio entre los años 1986, 1996, 2006, 2014 y 2019. Es importante mencionar que en este capítulo se presentan los datos relativos al área forestal, por ser el énfasis de las tres investigaciones que lo alimentan, pero en el documento base (González *et al.*, 2021) se pueden consultar las tenden-

cias relacionadas con otros tipos de suelo.

En general, el país logró, en el período en estudio, un balance neto que favoreció la cobertura forestal, gracias a una combinación de elementos propios de algunas políticas públicas y de la estructura productiva. Este resultado no es estático, por lo que es conveniente mencionar que se observan tendencias recientes que pueden amenazarlo. Por lo anterior, los análisis adicionales que se presentan en este capítulo sobre los patrones de los depósitos de carbono y la predicción relativa a la pérdida de cobertura arbórea constituyen aportes relevantes para diseñar la política forestal de cara al futuro.

En el país existen múltiples antecedentes de investigación en este campo. Por ejemplo, Sierra *et al.*, (2016) analizaron los patrones y los factores de cambio generados en la cobertura forestal natural durante el período 1987-2013. Según ese estudio, hacia fines de la década de los ochenta, las tasas de deforestación eran bajas (alrededor de 0,2% al año entre 1987 y 1997) y Costa Rica pasó de ser un país perdedor neto, a convertirse en un ganador neto de bosques nativos entre 1997 y 2008. A partir de la década del 2000 y hasta el 2013 se advierte una recuperación del área forestal, pues la regeneración bruta excede la deforestación bruta. Es importante señalar que esta sección no estudia directamente el uso de los bosques ni sus tipos, tampoco la deforestación *per se*, sino que se refiere a las tendencias que se advierten en un nivel macro, con base en datos que estudian el período y concluyen en el 2019; además, se analizan diversas combinaciones entre cambios de uso, considerando cobertura forestal, uso urbano, cultivos y pastos. En el Anexo Metodológico de este capítulo se detallan aspectos propios del abordaje técnico del estudio, que se sintetizan brevemente en el recuadro 4.1.

La cobertura forestal superó procesos de pérdida y se mantuvo como predominante

El análisis espacial aplicado a las clasificaciones de uso del suelo en el país muestra, en primer lugar, que durante los cinco momentos observados a partir de 1986 se presentó una misma jerarquía de

usos (gráfico 4.1). Es decir, la cobertura forestal representó el área más amplia en todas las mediciones, seguida por los pastos y los cultivos. El uso urbano representa, en todos los casos, la categoría más pequeña, con porcentajes menores al 5%. En conjunto, las pérdidas y ganancias en el cambio de uso favorecieron -en términos netos- la cobertura forestal, aunque con importantes diferencias territoriales y temporales.

El estudio de la distribución espacial evidencia que hay procesos de pérdida y de ganancia, en el territorio, que terminaron con un resultado global positivo. En los mapas 4.1 se observa la situación en los cinco momentos analizados. En 1986, la cobertura forestal abarcaba el 50,9% del área, mientras que diez años después esta era de solo el 39,1%. Ese cambio se presentó principalmente en la zona norte y en las llanuras del Caribe. Durante los años 2006 y 2014 se experimentó una mejora significativa, especialmente en la península de Nicoya, el Pacífico Central y la península de Osa. En el 2019 la recuperación alcanzó un porcentaje muy similar al de 1986, aunque la distribución espacial fue diferente: hubo una intensa pérdida en la zona norte y una ganancia a lo largo de la costa Pacífica.

En el caso de los pastos, el porcentaje de distribución se mantuvo relativamente estable, con un valor promedio de 33,4%. Estos se ubican, principalmente, en la provincia de Guanacaste, en la zona norte, en las llanuras del Caribe y en la cuenca del río Tárcoles. En la cuenca del río Tempisque, se experimentó una constante disminución y, en algunos cantones de Limón, esto obedeció al favorecimiento de ciertos cultivos; por el contrario, en la cuenca del río Tárcoles hubo un aumento de esta cobertura. Los cultivos muestran dos etapas con importante variación espacial. En el período 1986-2006, se incrementaron en un 8,3%, situación que ocurrió, con mayor intensidad, en la zona norte y en las llanuras de la vertiente Caribe. En el período 2006-2019 se presentó una disminución de un 7,9% en la cobertura agrícola, que se concentró en los alrededores de la Gran Área Metropolitana (GAM), especialmente hacia el norte de esa zona.

Recuadro 4.1

Aspectos metodológicos del estudio sobre cambios en el uso del suelo 1986-2019

El estudio que alimenta esta sección utilizó como fundamento una serie de mosaicos¹ provenientes de satélites Landsat, por medio del sistema de acceso a datos de observación de la tierra (Sepal por su sigla en inglés) y de la FAO, el cual utiliza *Google Earth Engine*. En cada caso se utilizaron imágenes corregidas, tanto atmosféricamente como por nubosidad. El análisis se realizó con un tamaño de píxel de 30 por 30 metros.

La determinación del uso de suelo se realizó mediante una clasificación supervisada. El método *ráster* de clasificación de archivos utiliza las firmas espectrales² de puntos de muestreo previamente seleccionados como base para clasificar la totalidad de píxeles que conforman la imagen, por esa razón se considera una generalización. Se eligieron 1.100 puntos de muestreo para cinco mosaicos en cuatro categorías, a saber: cobertura forestal, urbano, cultivo y pasto (las definiciones se presentan en el Anexo Metodológico al final del capítulo).

Posteriormente, se utilizó la herramienta *Create Signatures* del software *ArcGis 10.5* (ESRI, 2016); utilizando *Maximum Likelihood Classification*, del paquete *Multivariate*, se categorizaron de manera automática todos los píxeles de los mosaicos dentro de las cuatro categorías descritas. De esta manera, se obtuvo una aproximación a la distribución del uso de suelo de manera semi-automática. Para analizar la información procesada se utilizaron dos *softwares*: *ArcGis 10.5* (ESRI, 2016) para el cálculo de áreas, otras estimaciones y la creación de mapas; y *R (R Core Team, 2021)*.

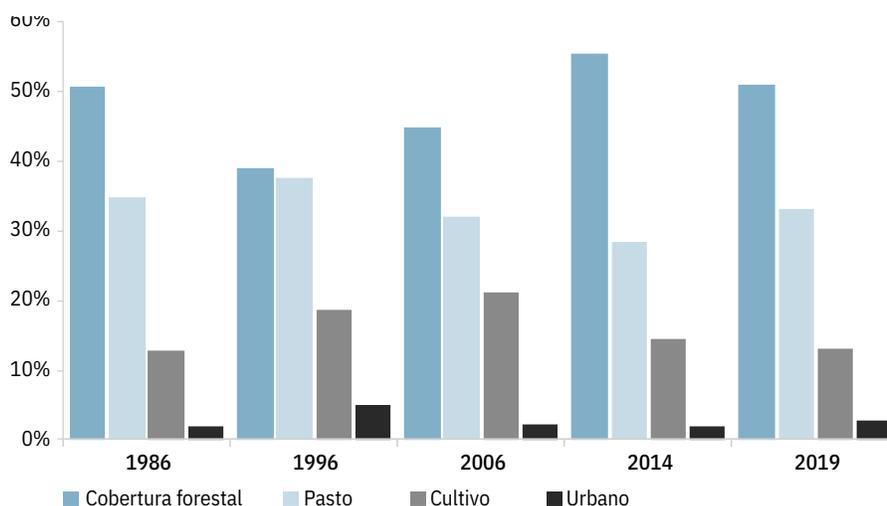
Para analizar los resultados se emplearon –principalmente– tres indicadores: i) tasa de cambio de uso; ii) peso porcentual del área cambiada y iii) área por tipo de uso. Los resultados se validaron con base en la metodología de Chuvieco (2010), aplicada por distintos proyectos a nivel nacional e internacional.

En el momento de leer los resultados de esta investigación se deben considerar algunas

limitaciones. La primera es la distancia temporal entre las capas utilizadas, que puede ser de diez años o menos. Por tanto, es posible que no se hayan captado los cambios en el uso que se produjeron entre una capa y otra. Además, utilizar cuatro grandes categorías de clasificación dificulta la consecución de altos niveles de detalle, deseable para otros análisis que lo requieran. Asimismo, el estudio se centra en procesos macro de cambio en el uso del suelo, por lo que no se alude a las modificaciones en la calidad de la cobertura, la degradación y otros procesos ecológicos, sociales y económicos detrás de cada tipo de cambio, pues no es un estudio explicativo multifactorial de procesos y sus catalizadores. Por último, en algunos mosaicos existía nubosidad que variaba de año a año, lo cual evita que se recuperen datos. A esta categoría se le nombra como *datos faltantes* en este trabajo; esos datos se circunscriben a zonas específicas previamente identificadas.

Fuente: González *et al.*, 2021.

Gráfico 4.1

Distribución porcentual del uso del suelo, por categorías^{a/}

a/ No se incluye la categoría de “datos faltantes”. El área urbana de 1996 tiene una variación muy grande, que puede corresponder a un error de categorización (González *et al.*, 2021)

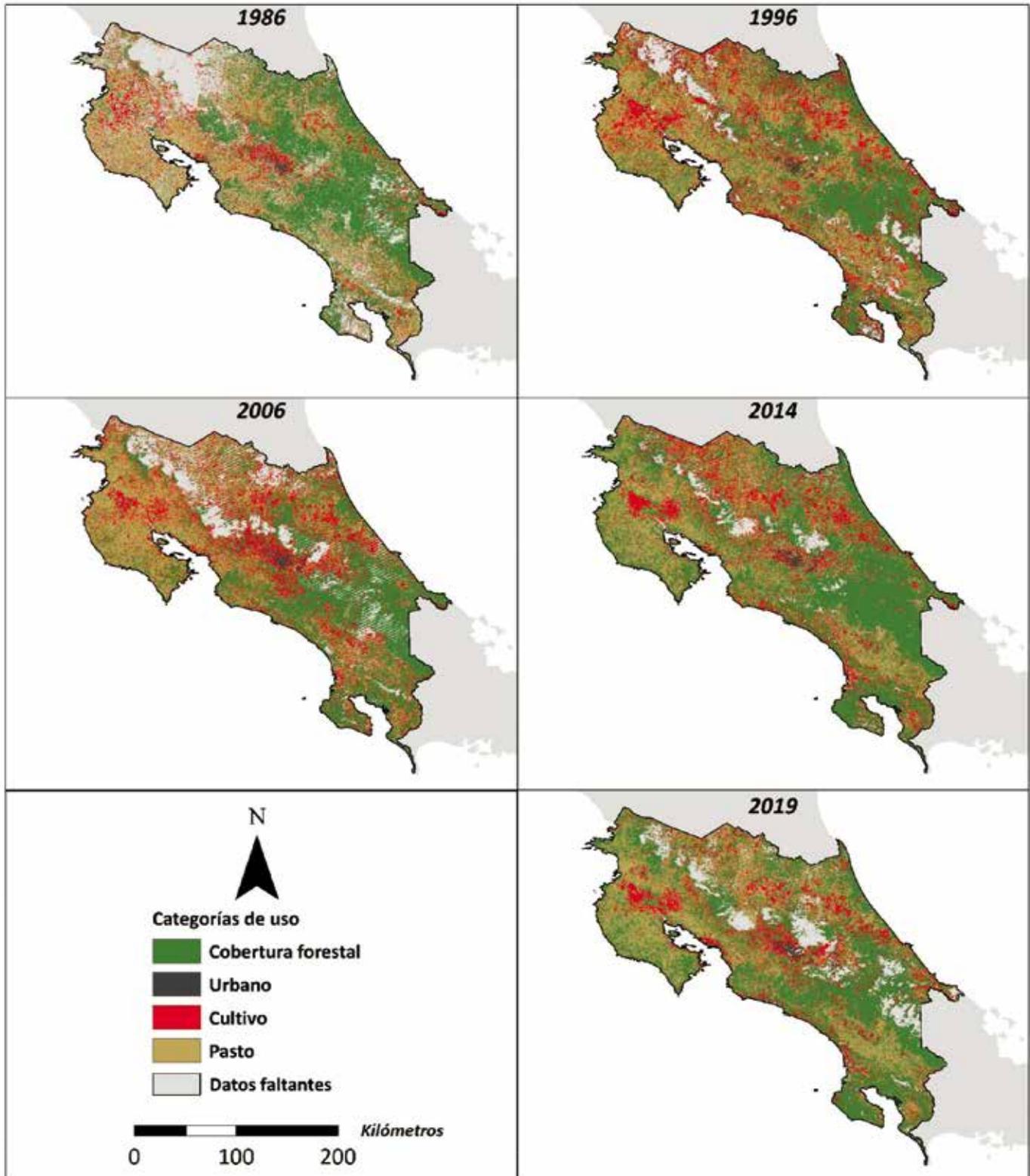
Fuente: González *et al.*, 2021 a partir de imágenes del satélite Sensor Landsat 5-7-8.

De manera general, el área urbana se mantuvo relativamente estable durante el período 1986-2019, con una media de 2,7% como porcentaje del territorio nacional, con excepción de 1996, año en el que, por su alto valor y la naturaleza de la categoría, es posible inferir un error de categorización (González *et al.*, 2021). Finalmente, es importante mencionar que los datos faltantes varían año con año, con un valor promedio de 15,4%, una proporción alta que debe considerarse en el momento de interpretarlos. Estas zonas, por lo general, se ubican en el eje montañoso central, a más de 2.500 metros sobre el nivel del mar, están cubiertas de vegetación y muestran una nubosidad permanente.

Si se analiza la tasa de cambio en cada subperíodo, es posible identificar ciertos patrones diferenciados de acuerdo con el uso (gráfico 4.2). La cobertura forestal registra un incremento de esa tasa desde 1986, hasta 2014. No obstante, en el

Mapas 4.1

Costa Rica: clasificación general del uso de suelo



lapso comprendido entre ese año y el 2019, la tasa es negativa. En lo relativo a cultivos y pastos, las tendencias son positivas en 1986, pero decrecen gradualmente hasta el 2014, por lo que se consideran tendencias negativas. A partir de esa fecha (2014) y hasta el 2019, las tasas vuelven a aumentar.

En suma, entre 1986 y 2019 el país vivió y revirtió procesos de pérdida de cobertura forestal, objeto central de este capítulo y de los aportes que se exponen más adelante. A pesar de que este logro es de largo plazo muestra diferencias territoriales y temporales, causadas por una dinámica de sustituciones con otros usos del suelo, y pone de manifiesto tendencias recientes que podrían comprometer el avance alcanzado.

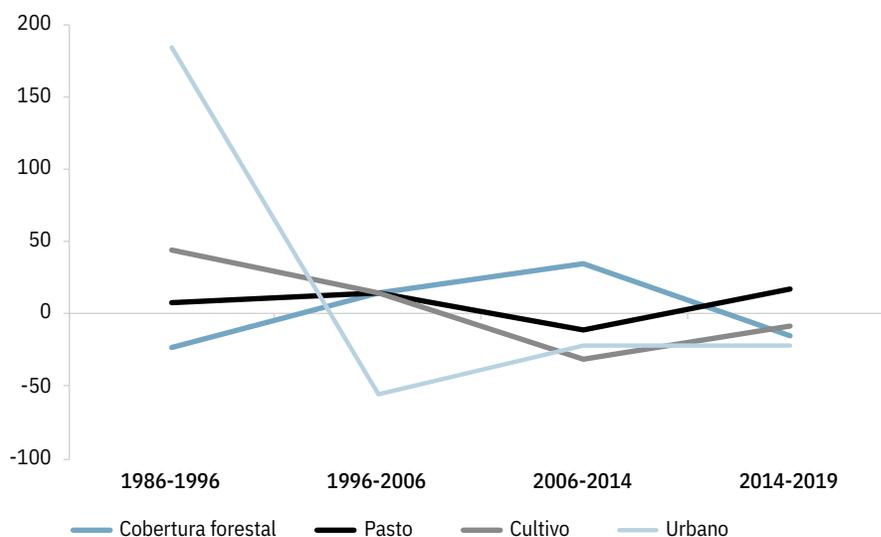
Pastos y cultivos presionaron la cobertura forestal a inicios del período

Aunque se registran resultados netos positivos en el período analizado, existe una dinámica de ganancias y pérdidas de terrenos donde se sustituye un uso por otro. Por lo tanto, resulta primordial conocer cuáles son las fluctuaciones que se dan en esos cambios de uso. En este acápite no se analizarán todos, porque el énfasis corresponde a la parte forestal. En consecuencia, se desglosan los movimientos centrales entre los usos forestales y los demás, con el propósito de subrayar la relevancia de este proceso en las políticas para la protección de los depósitos de carbono, un elemento central en materia de cambio climático y emisiones. Además, para abordar la identificación espacial de riesgos de deforestación ante las presiones presentes o futuras sobre el territorio forestal.

A continuación se describe temporal y espacialmente la dinámica de cambio que se produce entre diferentes tipos de uso del suelo. El gráfico 4.3 muestra, en términos absolutos, la extensión que correspondía a la cobertura forestal y fue sustituida por otros usos. En la primera década de la serie, un área significativa fue reemplazada por pastos y por cultivos en niveles similares. Entre 1996 y 2006, esa superficie disminuyó notablemente, un comportamiento

Gráfico 4.2

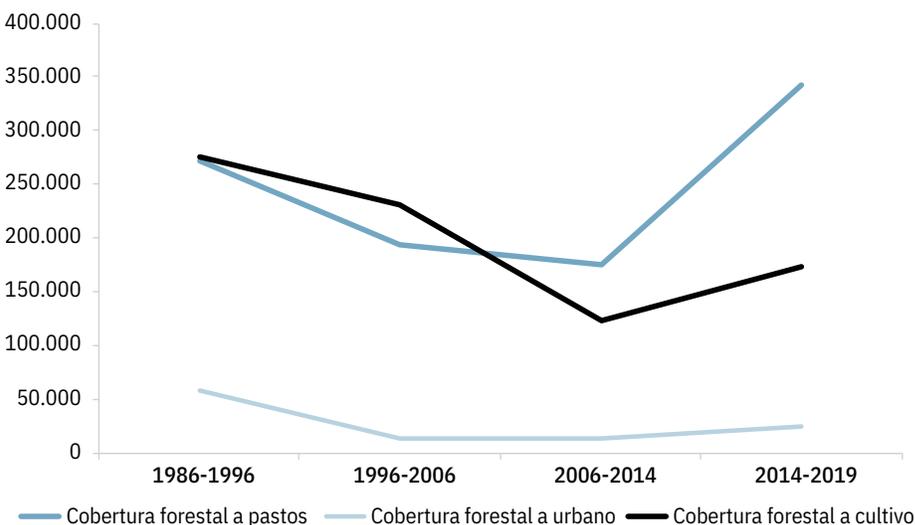
Tasa de cambio entre períodos en el uso del suelo, por categorías



Fuente: González *et al.*, 2021 a partir de imágenes del satélite Sensor Landsat 5-7-8.

Gráfico 4.3

Área de cobertura forestal que registra cambio hacia otros usos (hectáreas)



Fuente: González *et al.*, 2021 a partir de imágenes del satélite Sensor Landsat 5-7-8.

semejante se experimentó en el período 2006-2014, sobre todo en lo relativo a cultivos, que comienzan a perder importancia en el uso del territorio nacional, como se ha registrado en otras ediciones de este Informe. Durante el último plazo

analizado (2014-2019) repunta el área forestal, pues se dedica a los tres usos mencionados, aunque de manera más notoria a los pastos y cultivos.

En el caso de la sustitución por cultivos, los cambios han sido objeto de

discusión al analizar la llamada “frontera agrícola”. Como se observa en el mapa 4.2, entre 1986 y 1996 la cobertura forestal fue sustituida por cultivos en el área que comprende toda la franja de la zona norte y el Caribe Norte, así como en todo el territorio caribeño. En la costa pacífica, las transformaciones más relevantes se evidencian en el Pacífico Central y el Pacífico Sur, en el área que abarca de Pérez Zeledón al cantón de Coto Brus y desciende hasta la península de Osa. Entre 1996 y 2006, esta combinación

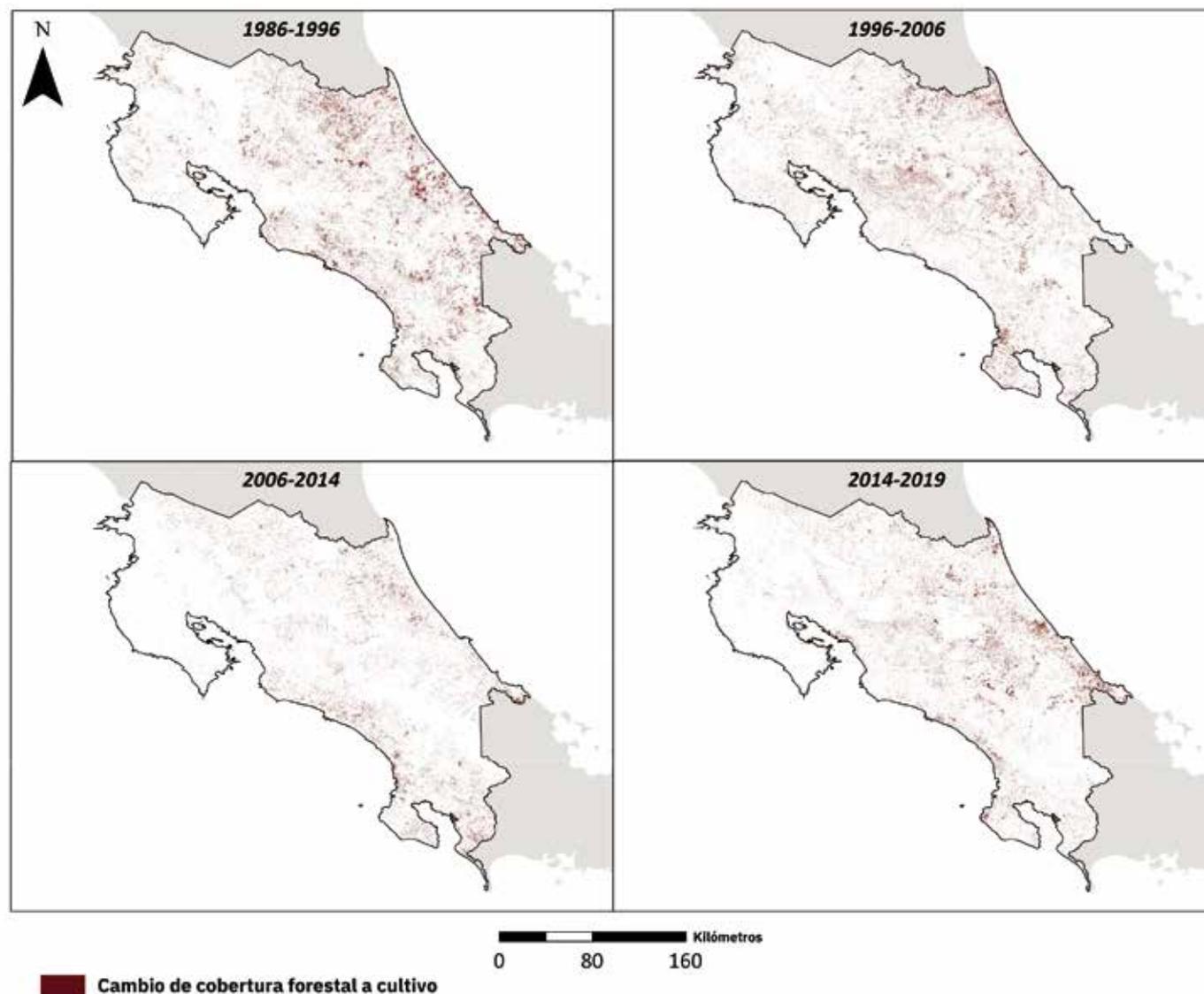
de usos se acentuó en el este de la zona norte y el Caribe Norte, en la península de Osa y sus alrededores, y en el centro del país hasta la zona que conecta con el Caribe. Durante el período 2006-2014 la transformación se concentra en el Caribe Norte y el Caribe Sur, a lo largo del Pacífico Central, la península de Osa y al oeste de la zona norte. Por último, del 2014 al 2019 se reemplazó la cobertura forestal por cultivos principalmente en el área localizada entre Turrialba y el Caribe, y desciende hasta el Caribe Sur.

En el Caribe Norte sobresale Barra del Colorado. En el Pacífico Central se identifican zonas de conversión que descienden hasta la península de Osa.

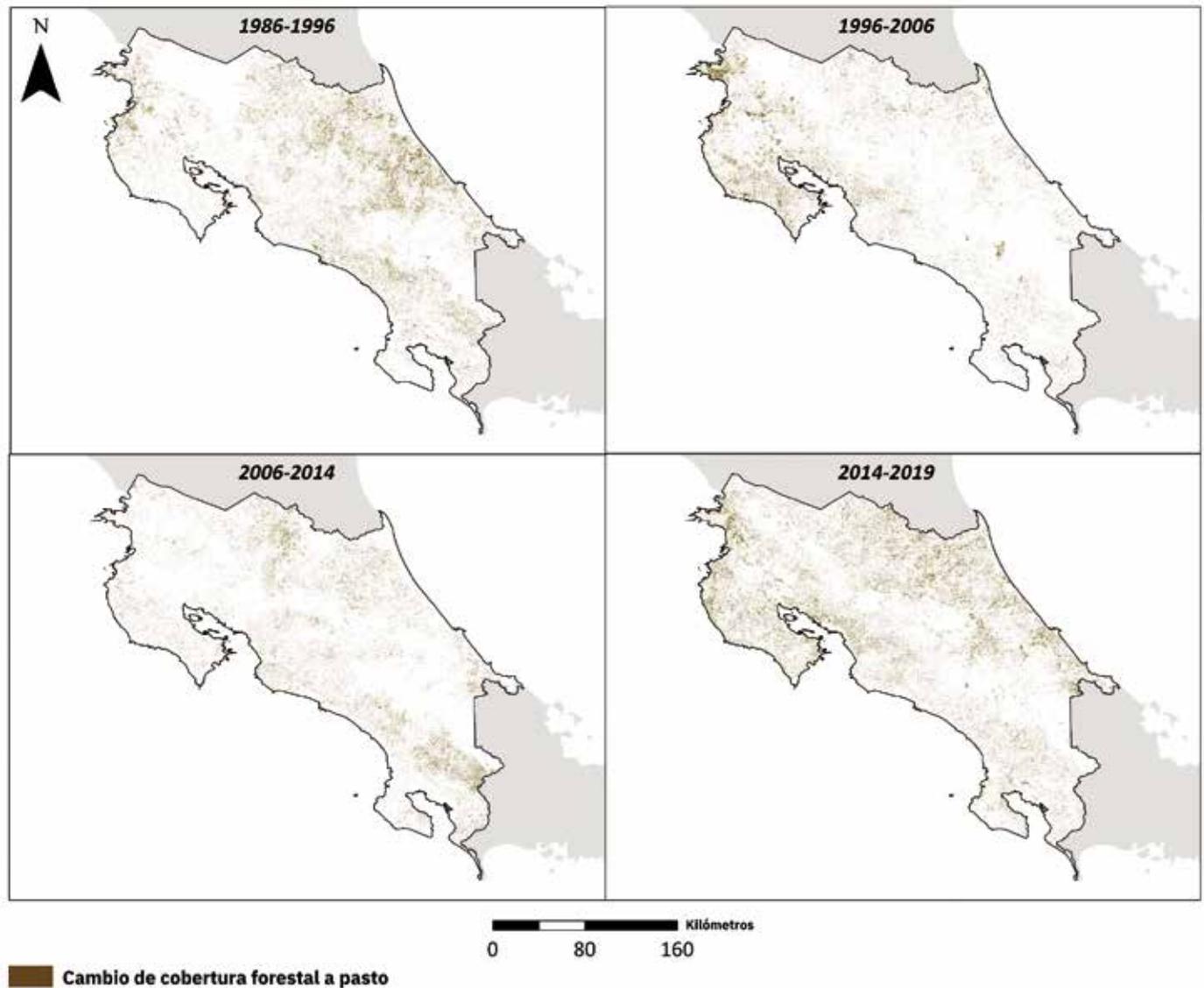
Si se toma 1986 como base, se obtiene una tasa de cambio de -16,5% entre los períodos de 1986-1996 y 1996-2006, de -46,9% entre 1996-2006 y 2006-2014, y de 41,7% entre 2006-2014 y 2014-2019. Esto significa que la sustitución de cobertura forestal por cultivos decreció, con variaciones negativas importantes hasta el 2006-2014. Sin embargo, en el período

Mapa 4.2

Costa Rica: cambio del uso del suelo de cobertura forestal a cultivos



Mapa 4.3

Costa Rica: cambio del uso del suelo de cobertura forestal a pastos

Fuente: González *et al.*, 2021.

2014-2019 repuntó con una tasa positiva de 41,7%.

Por su parte, la variación de cobertura forestal a pastos en el uso de suelo, explica la mayor parte de su reducción en el período en estudio. En promedio, entre 1986 y 2019, el 52,3% de las hectáreas que dejaron de ser cobertura forestal se transformaron en pastos. El patrón de este tipo de cambio inicia con una reducción durante el período 1986-2014 y culmina con un aumento entre 2014 y 2019.

Entre 1986 y 1996, el 45% (272.275 hectáreas) de la cobertura forestal fue destinada a pastos. Posteriormente, entre los años 2006 y 2014, esta área disminuyó y alcanzó su valor más bajo: 174.157 hectáreas. Así, entre el año 1986 y 2014 la tasa de crecimiento fue negativa y mostró un valor promedio de -19,5%. Sin embargo, a partir de este momento, entre los años 2014 y 2019, hubo un incremento en este tipo de sustitución con una tasa de crecimiento del 96,8%.

Si se analiza la distribución espacial del reemplazo del uso forestal por pastos (mapa 4.3), también se observan diferencias. En el período 1986-1996, esa sustitución fue mayor en la región Caribe; de 1996 a 2006 se concentró principalmente en la provincia de Guanacaste. Entre 2006 y 2014 se centralizó en la zona norte y la frontera sur del país. Finalmente, a partir de 2014 y hasta 2019, estos cambios se diseminaron en gran parte del territorio nacional, especialmente en las regiones

Caribe, Pacífico Central, zona norte y provincia de Guanacaste. De hecho, el 12% de la cobertura forestal en 2014 varió a pastos en el 2019, lo que representó un 24,6%; es decir, casi una cuarta parte de los pastos existentes en ese año fueron precedidos por cobertura forestal. Estos resultados posicionan el cambio de uso de suelo hacia pastos como el más relevante en el proceso de reducción de cobertura forestal en el ámbito nacional, durante la segunda mitad de la década de los ochenta y en el 2019.

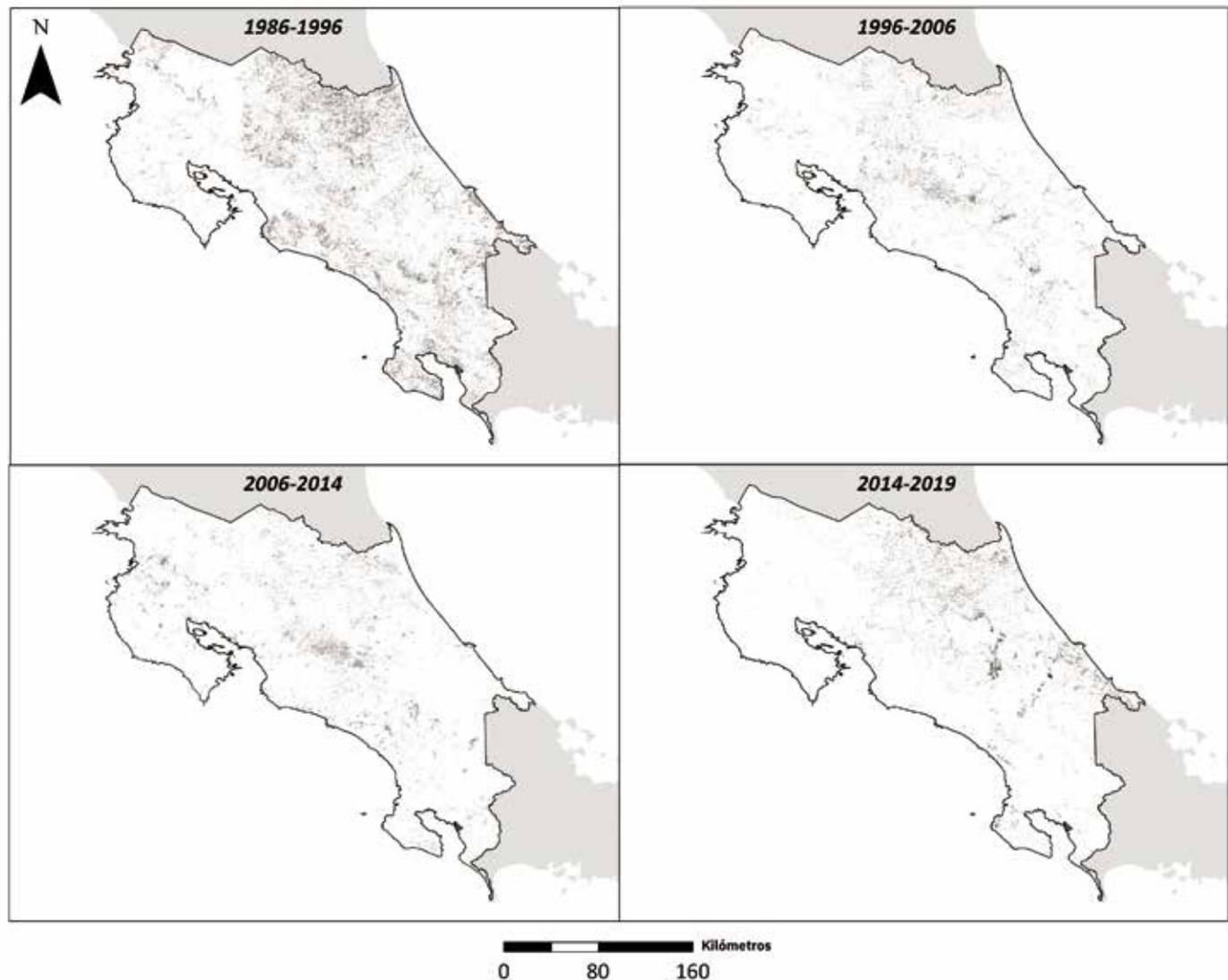
También se han reportado cambios de cobertura forestal por mancha urbana, aunque esta es de menor proporción en términos relativos. En el intervalo 1986 y 2019, en promedio, el 5,3% de las hectáreas que dejaron de ser cobertura forestal fueron reemplazadas por suelo urbano. Esa cifra muestra un comportamiento estable a través del tiempo. En los dos primeros años que se analizaron (1986 y 1996) alcanzó su valor máximo de 9,4% y, a partir de ese momento y hasta el 2019, se mantuvo en una media de 4%.

Aunque el aporte de la mancha urbana al proceso de reducción de cobertura forestal es relativamente pequeño, es importante mencionar que, entre 2014 y 2019, se observa una tendencia hacia el alza, pues un total de 173.211 hectáreas experimentaron esa sustitución; lo que representa una tasa de crecimiento del 80,4%.

Desde la perspectiva espacial, entre 1986 y 1996 este tipo de transformación estuvo concentrada principalmente en la zona norte, el Caribe Norte y el sur del país (mapa 4.4). Durante el período

Mapa 4.4

Costa Rica: cambio del uso del suelo de cobertura forestal a uso urbano



■ Cambio de cobertura forestal a urbano

1996-2014 no se observa un patrón claro en ese proceso, con excepción del surgimiento de algunas zonas pequeñas y nuevas de mancha urbana distribuidas en el territorio. Finalmente, entre 2014 y 2019, las hectáreas sustituidas se agruparon principalmente en la zona del Caribe. Este tipo de sustitución fue mayor en 1996: el 23,7% del uso urbano desarrollado en la década previa había sido cobertura forestal al inicio de ella.

Cobertura forestal “robó” territorio a pastos y cultivos

El efecto de las sustituciones de cobertura forestal a otros usos -analizado en la sección anterior- no tuvo un balance negativo al final del período, porque también se dio, desde cierto momento, un cambio de áreas con pastos y cultivos hacia usos forestales. Esta dinámica fue predominante a partir de 2006, y permitió un resultado neto positivo en el período completo (1986-2019), que respondió en parte a políticas públicas, una normativa más restrictiva y el apoyo de iniciativas públicas y privadas que impulsaron el uso de herramientas de conservación novedosas en el país (recuadro 4.2).

El gráfico 4.4 muestra la evolución del área que fue transformada de otros usos a cobertura forestal. Los pastos y cultivos siguieron un comportamiento muy similar. Se experimentó un crecimiento hasta el período 2006-2014 y, en el siguiente lapso, el área disminuyó, tanto en ambos momentos y tendencias como en cantidades importantes. Esto significa que en la etapa correspondiente a mediados de los años noventa y la década del 2000, en el marco de cambios de política y normativa forestal -que este Informe ha reportado en otras ediciones- y de la estructura productiva del país, varias zonas de pasto y cultivo cedieron a la recuperación y conversión hacia cobertura forestal, situación que sigue existiendo, aunque con una tendencia reciente a la baja.

Los mapas 4.5 muestran en detalle estos patrones en el territorio. El cambio de uso de suelo de pastos a cobertura forestal es el que más aporta a la recuperación que se logra entre 1986 y 2019. En promedio, alrededor del 55,7% de las hectáreas convertidas en cobertura

Recuadro 4.2

Costa Rica: 30 años con iniciativas de inversión en la conservación y recuperación forestal

Por más de tres décadas, Costa Rica ha impulsado políticas y normativa enfocadas en lograr un uso más sostenible de los recursos naturales de sus ecosistemas. A principios de los años 80, la cobertura forestal del país se encontraba cerca de los niveles mínimos históricos, producto de la visión desarrollista agropecuaria de las décadas anteriores. Es por esa razón que se impulsan iniciativas ligadas al objetivo de detener el cambio de uso del suelo no deseado y a la protección y uso sostenible de los recursos naturales; se promueven leyes y decretos, se crean instituciones como Fonafifo y se lanzan iniciativas sin fines de lucro en apoyo de esos objetivos, como es el caso, entre otros, de la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (Fundecor).

Fundecor es fundada el 17 de mayo de 1989 con fondos de USAID y con el beneplácito del Gobierno de Costa Rica, como organización orientada al desarrollo sostenible y al establecimiento de la protección del patrimonio natural del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central de Costa Rica (hoy conocida como Área de Conservación Central) y sus zonas de amortiguamiento.

Dentro de las soluciones propuestas para promover el cuidado de los bosques, se desarrolló en el país el mecanismo de compensación denominado Pago por Servicios Ambientales (PSA), impulsado con participación de Fundecor y respaldado por la comisión encargada de diseñar la que posteriormente sería la Ley Forestal (n° 7775; Alfaro, 2005). El PSA, desde su concepción y ejecución ha constituido una innovación en el sector ambiental costarricense. En ese marco, Fundecor ha brindado asistencia técnica a propietarios de 54.122

hectáreas, tanto en la región Central, como en la región Huetar Caribe. Es importante señalar que gran parte de esta área se ha mantenido protegida por más de 25 años, asegurando que el bosque sea un refugio para la biodiversidad local.

Asimismo, Fundecor, en conjunto con algunos entes estatales, ha realizado esfuerzos importantes para reducir la deforestación dentro del Área de Conservación Central y sus zonas de amortiguamiento. Entre 1991 y 1996 la tasa de deforestación se redujo drásticamente de 7.000 a 1.000 hectáreas por año, gracias a mecanismos como el PSA, el manejo sostenible del bosque, esquemas de reforestación comercial y la compra de madera por adelantado. En 1997, la organización obtuvo el primer certificado forestal en Latinoamérica que reúne, bajo un esquema sombrilla, a los pequeños propietarios bosques, bajo el esquema UMF/CoC de FSC® Internacional. Lo anterior, promueve una competitividad basada en la diferenciación y las economías verdes.

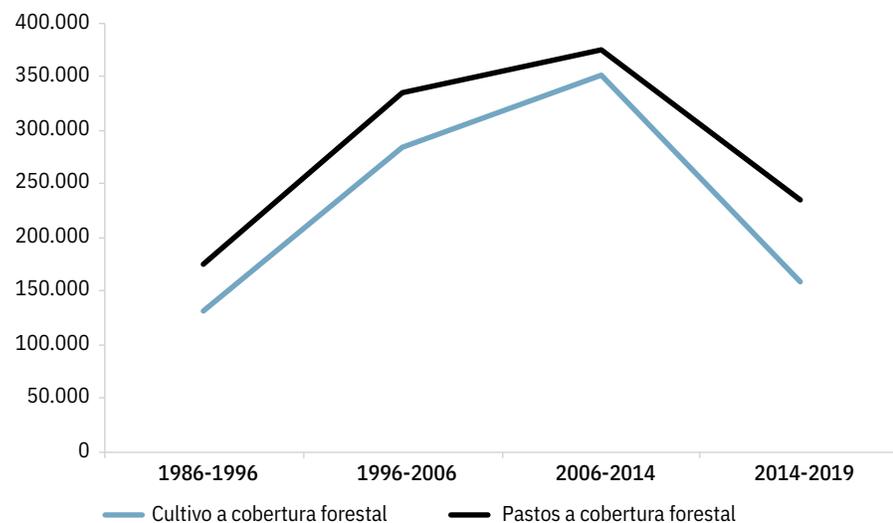
Fundecor ha incursionado en otros grandes temas como la transformación y comercialización de la madera mediante la creación de dos empresas: Fundecor Bosques S.A. y *In The Woods by Fundecor*; el reabastecimiento de agua a la naturaleza (se han logrado 603.000 metros cúbicos de agua reabastecidos por año en un período de seis años) mediante el fondo de agua *Agua Tica*, de la cual es la secretaria técnica; monitoreo de la biodiversidad en conjunto con instituciones académicas; así como cambio climático y trabajo comunitario a través de proyectos de Forestería Análoga y transferencia de conocimientos.

Fuente: Campos y Guerrero, 2021.

Gráfico 4.4

Área con cambio de otros usos del suelo a cobertura forestal

(hectáreas)

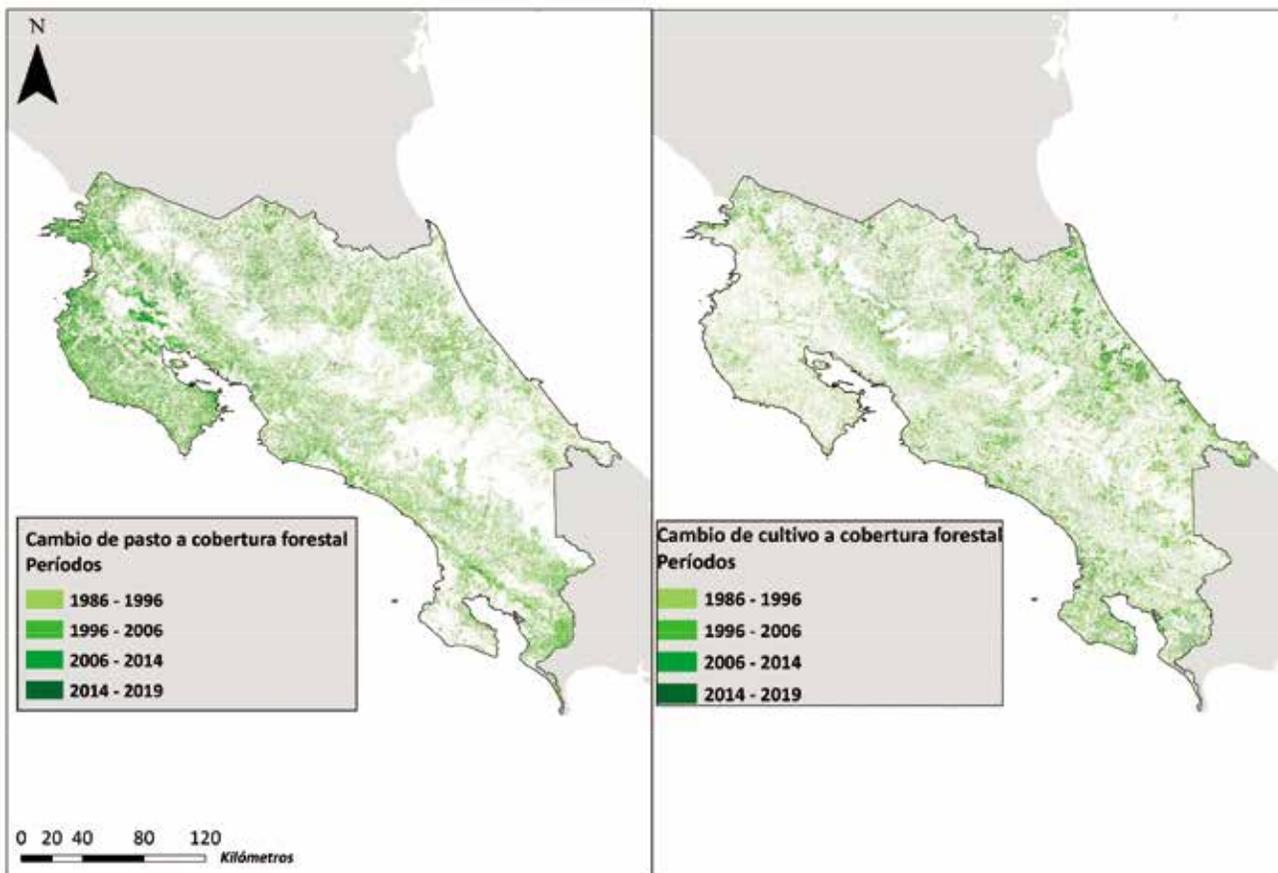


Fuente: González *et al.*, 2021 a partir de imágenes del satélite Sensor Landsat 5-7-8.

forestal provienen de ese uso anterior. Este tipo de sustitución muestra dos tendencias distintas en el tiempo. La primera inicia con un marcado crecimiento entre 1986 y 2014, y la segunda, muestra un fuerte decrecimiento en los últimos cinco años de este estudio. A lo largo del período, algunas zonas hicieron mayores aportes; entre 1986 y 1996, una parte significativa de ellos se ubicó en la provincia de Guanacaste, específicamente en la península de Nicoya, así como en el Pacífico Norte y en la zona sur del país. Posteriormente, entre 1996 y 2006, su distribución fue generalizada en el territorio. Desde el 2006 hasta 2014, se localizó mayoritariamente en Guanacaste y el Pacífico Norte y, en menor grado, en el Caribe. La distribución espacial de este comportamiento se mantuvo durante los últimos seis años analizados, con una participación importante en la zona norte.

Mapas 4.5

Costa Rica: cambios de uso del suelo de cultivos y pastos hacia cobertura forestal



Fuente: González *et al.*, 2021.

El patrón de cambio de cultivo a cobertura forestal no ocurrió de forma homogénea en todo el territorio. En el período 1986-1996 se presentó en algunas franjas del centro del país, que se ubican hacia el noroeste y se ensanchan al llegar a la provincia de Guanacaste. El mismo fenómeno ocurrió, paralelamente, en el Caribe Sur y en el Valle de la Estrella. En el sur se identificaron áreas en la península de Osa y en la zona que comprende los cantones de Golfito y Corredores. Entre 1996 y 2006, Guanacaste siguió presentando evidencias de este cambio, sobre todo en el noroeste, alrededor de la bahía de Santa Elena y en la parte suroeste de la provincia.

**PARA MÁS INFORMACIÓN SOBRE
GRANDES CAMBIOS DE USO
DEL SUELO**

véase González *et al.*, 2021,
en www.estadonacion.or.cr

En el período 2006-2014, se identificaron variaciones en el uso del suelo hacia cobertura forestal en el cantón de La Cruz y zonas aledañas, y en la franja que desciende desde el cantón de Liberia hasta el centro del país. Importantes sustituciones se muestran en la zona que comprende Turrialba, Guácimo, Siquirres y Matina, y que asciende hasta el Caribe Norte. También en la península de Osa y en las zonas alrededor del Golfo Dulce se cuantificaron importantes cambios. Entre 2014 y 2019 es el lapso en el que menos transformaciones se registran. Las principales zonas de reemplazo se dieron entre los cantones de Upala, Guatuso y Los Chiles en la zona norte, descienden hasta Tilarán y alrededores. En el Caribe, los cambios se evidencian en el área que comprende los cantones de Guácimo, Siquirres y Matina, al igual que en zonas alrededor del humedal nacional Terraba-Sierpe, en el sur del país.

En los primeros períodos la tasa de cambio de cultivos a cobertura forestal fue positiva, se ubicó por encima del 100%, muy alta en una primera instancia; no obstante, posteriormente cayó

en 92,2 puntos porcentuales, aunque las cifras siempre resultaron positivas. Lo anterior puede ser evidencia de recuperación de cobertura en terrenos donde las personas propietarias iniciaron procesos de protección o mantuvieron ese uso. Esta situación respondió a diferentes razones: PSA, creación de reservas privadas u otras. Sin embargo, en el lapso más reciente la tasa fue negativa (-55,1%), lo que muestra un decrecimiento de la tendencia de reconversión a cobertura forestal (González *et al.*, 2021).

Depósitos forestales de carbono: patrones temporales y espaciales (1986-2019)

La sección anterior demostró que el país ha tenido políticas públicas y ha vivido cambios productivos que permitieron controlar la pérdida de cobertura forestal y recuperarla. Sin embargo, recientemente se han percibido ciertas presiones que, en términos territoriales, determinan un juego de pérdidas y ganancias que repercute en algunas zonas concretas. Esos resultados permiten identificar la relevancia de estudios para medir y actuar en torno a un tema central en el valor de los bosques: el potencial de mitigación del cambio climático. Costa Rica ha realizado importantes esfuerzos para alcanzar ese propósito (conservar y recuperar cobertura forestal), aunque no así en relación con la reducción de emisiones en otros grandes sectores que este Informe ha analizado en diversas ocasiones: el sistema de transporte y la movilidad, el consumo de hidrocarburos o las prácticas agropecuarias, entre otros.

Esta sección se enfoca en el primer aspecto y presenta una investigación novedosa de Durán Monge y Aragón (2021) que contribuye al análisis de la función de los bosques como depósitos de carbono. Este estudio se complementa al final del capítulo con otro análisis sobre el riesgo de pérdida de cobertura; uniendo tres investigaciones que son insumos para el diseño de políticas forestales de cara al futuro.

Los bosques son un componente clave del ciclo global de carbono (Fonseca *et al.*, 2020) y, por tanto, tienen un efecto directo sobre la concentración atmosférica

de dióxido de carbono (CO₂) que genera el efecto invernadero y, en consecuencia, el cambio climático global. Los ecosistemas forestales son multifuncionales (Morison *et al.*, 2012): constituyen depósitos y sumideros que almacenan y remueven CO₂ por lo que resultan un factor determinante en la mitigación del cambio climático (Loustau, 2010) y, al mismo tiempo, debido a la deforestación y a la degradación, pueden funcionar como una fuente de emisiones al liberar los gases efecto invernadero (GEI) que almacenan.

Por ese este motivo, es clave comprender la dinámica de los depósitos forestales de carbono del país y el comportamiento de las remociones y emisiones de GEI, asociadas con cambios en el uso del suelo. Esto para apoyar una discusión pública informada y proveer de herramientas a la política pública, con el fin de maximizar el potencial de mitigación. Lo anterior cobra mayor relevancia frente a los compromisos internacionales de Costa Rica en esta materia, como el *Acuerdo de París*, la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático* y políticas recientes como el *Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050* (Minae, 2019a).

El estudio que alimenta esta sección se basa en la serie histórica de mapas de cobertura terrestre de la Estrategia Nacional REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques), y realiza un análisis exploratorio que tiene por objetivo central estudiar los patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, así como las remociones y emisiones derivadas de los cambios ocurridos en la cobertura forestal en Costa Rica entre 1986 y 2019. Lo anterior permite entender el efecto de esos patrones en el potencial forestal para la mitigación del cambio climático, y se realiza usando la división territorial definida por el Sinac-Minae: áreas de conservación.

Aunque el estudio es novedoso, se alimenta de un importante conjunto de esfuerzos académicos e institucionales previos. Entre estos antecedentes se pueden citar aportes de Minae (2016), Fonseca *et al.*, (2020), Morera (2019),

Retana-Chinchilla et al., (2019), Fonseca et al. (2019 y 2020), REDD (2019 y 2020), Programa REDD/CCAD-GIZ-Sinac (2015) y del Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF), entre otros. Una mención al contenido de estos aportes se puede consultar en Durán Monge y Aragón (2021). La investigación fue posible gracias a la colaboración del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (Fonafifo), la Estrategia Nacional REDD+ y el apoyo de personas expertas del Instituto Meteorológico Nacional

(IMN) y del Instituto de Investigación y Estudios Forestales (Inisefor) de la UNA. Parte de este acompañamiento permitió definir y afinar detalles metodológicos complejos. Una descripción detallada de los procedimientos utilizados, los supuestos, limitaciones y aspectos técnicos se encuentra en el Anexo Metodológico al final de este capítulo y en Durán Monge y Aragón (2021). El recuadro 4.3 presenta una breve síntesis de los aspectos más generales.

Stock de carbono tiene más presencia pero mayor vulnerabilidad en zonas no protegidas

Este capítulo estima que entre 1986 y 2019 los depósitos forestales de carbono en el ámbito nacional alcanzaron un valor promedio anual de 1.055 millones de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e), y muestran una tendencia de relativa estabilidad a lo largo de ese período. Este comportamiento es resultado de una combinación de pérdidas y ganancias

Recuadro 4.3

Estudio sobre depósitos forestales de carbono, emisiones y remociones: resumen metodológico

Para analizar los patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, así como las remociones y emisiones derivadas de los cambios en la cobertura forestal, el estudio que alimenta esta sección se basa en cuatro fuentes de información. En primer término, la serie histórica de mapas de cobertura del suelo de REDD+ (Minae, 2019b) para diez cohortes (1986, 1992, 1998, 2001, 2008, 2011, 2013, 2015, 2017 y 2019), con una resolución de píxeles de 30 por 30 metros. En segundo lugar, la base de datos de densidades de carbono de Costa Rica en el 2015, y actualizada por Durán Monge y Aragón (2021) para esta investigación con publicaciones realizadas hasta el 2020. También se utilizó la herramienta relativa a las referencias de emisiones forestales, medición, reporte y verificación (NRE/MRV), denominada *FREL & MRV Tool* por sus siglas en inglés (Minae, 2019b), especialmente la sección de depósitos de carbono, que se alimenta de los parámetros generados mediante la base de datos de densidades de carbono. Por último, se tomaron las densidades de carbono estimadas por REDD+ Costa Rica y el Catie (Obando et al., 2021), a partir del Inventario Nacional Forestal (INF) para un ejercicio exploratorio adicional.

Este estudio utiliza como unidad analítica las once áreas de conservación del país a cargo del Sinac-Minae, aunque no se considera el Área de Conservación Marina Cocos (ACMC) por falta de información. Esta elec-

ción responde a que constituyen un punto de referencia para la planificación y desarrollo de políticas de conservación y sostenibilidad en el manejo de los recursos forestales. El procedimiento constó de cuatro grandes etapas: i) actualización de la base de datos de densidades de carbono de Costa Rica y la herramienta *NRE/MRV*; ii) análisis espacial y temporal de depósitos forestales de carbono; iii) análisis espacial y temporal de las emisiones y remociones por cambios en cobertura forestal, y iv) escenario de depósitos forestales ajustado según densidades de carbono en ASP. Las definiciones de los conceptos utilizados, así como detalles metodológicos, mecanismos de cálculo y supuestos se detallan en el Anexo Metodológico al final del capítulo.

La investigación que aquí se sintetiza presenta varias limitaciones metodológicas. En primer lugar, se utilizan supuestos para modelar los depósitos de carbono, emisiones y remociones. Estos son necesarios para generar estimaciones, pero pueden excluir condiciones ajenas al control del estudio. Además, si bien el INF es el esfuerzo oficial para estimar las existencias de recursos forestales, presenta algunas debilidades en cuanto a la información disponible y en la distribución desigual de las parcelas en los distintos estratos (Pedroni y Villegas, 2016; REDD, 2021). Por esa razón, se complementa con una revisión bibliográfica que se registra en la base de datos de densidades de carbono y, posteriormente, es utilizada para definir los parámetros de la herramienta *NRE/MRV*. También existen limitaciones en las

estimaciones de carbono asociadas con los reservorios contemplados en el análisis, particularmente porque no se considera el carbono orgánico del suelo (Pedroni y Villegas, 2016; Harris et al., 2012; Fonseca, 2017). Esto implica estimaciones conservadoras de los depósitos, emisiones y remociones. Por último, debido a dificultades técnicas y de disponibilidad de información, el estudio no incluye la degradación, que es un proceso que se ha venido incrementando (REDD, 2021). Cuando se utiliza el término emisiones en esta sección, se refiere exclusivamente a las emisiones por deforestación. Asimismo, es importante aclarar que por “deforestación” no se está entendiendo un proceso necesariamente ilegal, sino un cambio de uso de esa cobertura, que trasciende su marco formal.

Las características del sector agricultura, forestal y de otros usos del suelo afectan la precisión de las estimaciones de emisiones, remociones y existencias de carbono. Por ese motivo, como en toda investigación, las estimaciones suponen una incertidumbre que fue debidamente identificada en cada caso. La incertidumbre de los datos concernientes a los cambios en el uso del suelo, los mapas de cobertura y los factores de emisión se detallan en el Anexo Metodológico al final del capítulo y en Durán Monge y Aragón (2021).

Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021.

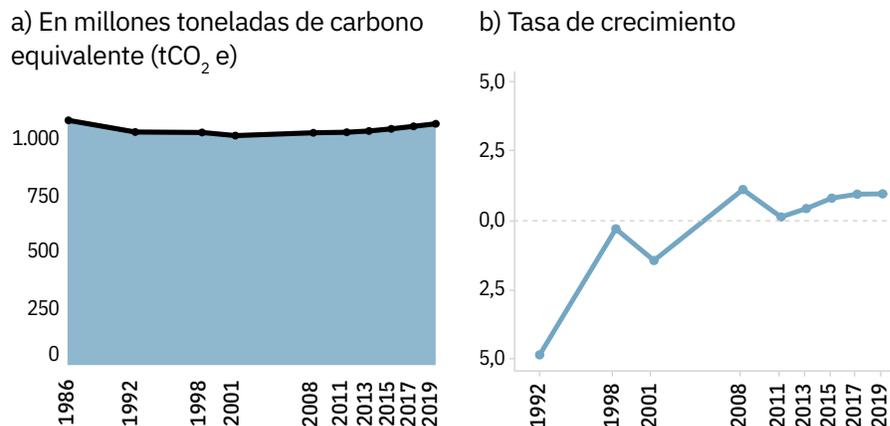
en el *stock* de carbono en el tiempo y no se ha distribuido de manera homogénea en el territorio. Hay regiones que muestran un deterioro en sus existencias forestales de carbono; no obstante, otras han logrado incrementarlas. En algunas zonas se registran pérdidas que no se han recuperado y que, probablemente, necesitarían cientos de años para alcanzarlo. Además, es notorio que la recuperación de existencias ha ocurrido principalmente fuera de las áreas protegidas. Esto conlleva riesgos, pues se reconoce una mayor vulnerabilidad futura en los bosques que no responden a esquemas formales de resguardo.

En los años intermedios del período hubo ciertas fluctuaciones en los depósitos de carbono (gráficos 4.5). La mayor disminución se registró entre 1986 y 1992, con un -4,8% (pasó de 1.095,6 millones de tCO₂ e a 1.043,5 tCO₂ e). Luego de alcanzar su nivel más bajo (1.027,4 millones de tCO₂ e) en el año 2001 y con una relativa estabilidad, se observa una recuperación a partir del 2008 que se acelera en 2015 y 2019. En ese último año, el *stock* de carbono nacional se estima en 1.080,3 millones de tCO₂ e. Pese a esa recuperación, aún no se alcanzan los niveles de depósitos forestales de carbono de finales de la década de los ochenta. Los factores que explican este comportamiento -tanto en las políticas forestales como en las apuestas productivas- son retos de investigación para el futuro. Sin embargo, el análisis de este capítulo ofrece algunas luces sobre ciertas presiones antropogénicas que lo influyen.

Desde la perspectiva espacial se observa un patrón de concentración de los depósitos que, además, se ha mantenido a través del tiempo, en especial en algunas áreas de conservación que contienen grandes parques nacionales y cobertura forestal a su alrededor. Los mapas 4.6 muestran una selección de cohortes: la inicial (1986), el punto más bajo (2001), la de mayor crecimiento (2008) y la última disponible (2019). Las áreas de conservación La Amistad Caribe (ACLAC) y Central (ACC) acumulan la mayor parte del *stock* nacional de carbono, con valores promedio de 20,7% y 17,9%

Gráfico 4.5

Evolución de los depósitos forestales de carbono



Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021, con datos de Minae, 2019b.

en todo el período, respectivamente. La presencia de tres parques nacionales de gran extensión (Chirripó, La Amistad y Braulio Carrillo) juega un papel determinante en esta situación, aunque también se identifican importantes sumideros en su periferia. Estas condiciones posicionan ambas áreas de conservación como las de mayor potencial forestal de mitigación del cambio climático.

Las áreas Huetar Norte (ACAHN), La Amistad Pacífico (ACLAP), Tempisque (ACT) y Osa (Acosa) muestran valores intermedios en depósitos forestales de carbono, que oscilan entre el 8,8% y el 13,2% del *stock* total nacional. Mientras cuatro zonas registran los niveles más bajos (en promedio 4,8%) y con menor potencial de mitigación del cambio climático: Tortuguero (ACTO), Arenal Tempisque (ACAT), Guanacaste (ACG) y Pacífico Central (Acopac).

Este patrón está claramente asociado con la distribución de los bosques según su tipo (primario o secundario) y estrato (muy húmedos y pluviales, húmedos, secos, manglares o bosques de palma). Las áreas de conservación con niveles más altos en depósitos de carbono combinan el bosque primario del estrato muy húmedo y pluvial; esos depósitos poseen la mayor capacidad de almacenamiento de carbono por hectárea, según las

estimaciones de densidades de carbono de la herramienta NRE/MRV (Minae, 2019b). Esto muestra que los esfuerzos localizados y enfocados en la protección o recuperación de cobertura forestal en zonas con este perfil pueden tener mayor impacto en lo concerniente a la mitigación de cambio climático. Esto no significa que se deba descuidar la protección de otras áreas, ni desatender las medidas tendientes a aumentar la cobertura en todo el país, no solo por el potencial de mitigación en todo el territorio, sino por todos los demás objetivos ambientales que implica la agenda de conservación.

PARA MÁS INFORMACIÓN SOBRE
DEPÓSITOS FORESTALES
DE CARBONO, EMISIONES Y
REMOCIONES POR CAMBIOS EN LA
COBERTURA

véase Durán Monge y Aragón, 2021,
2021, en www.estadonacion.or.cr

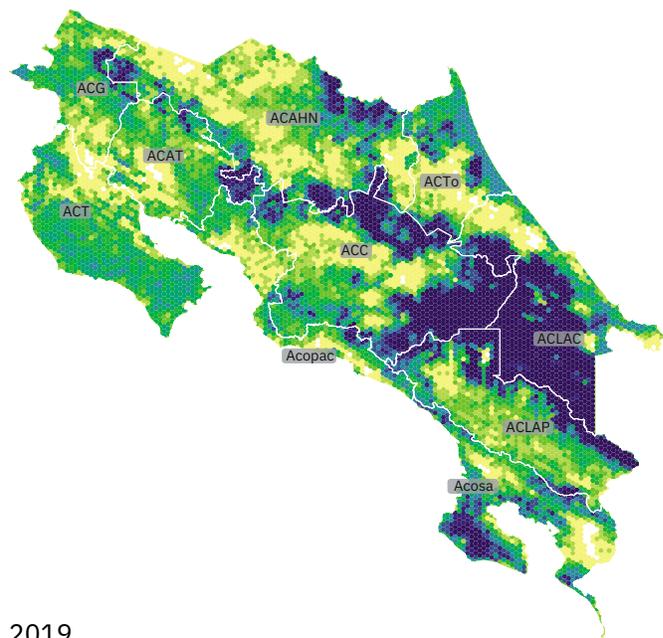
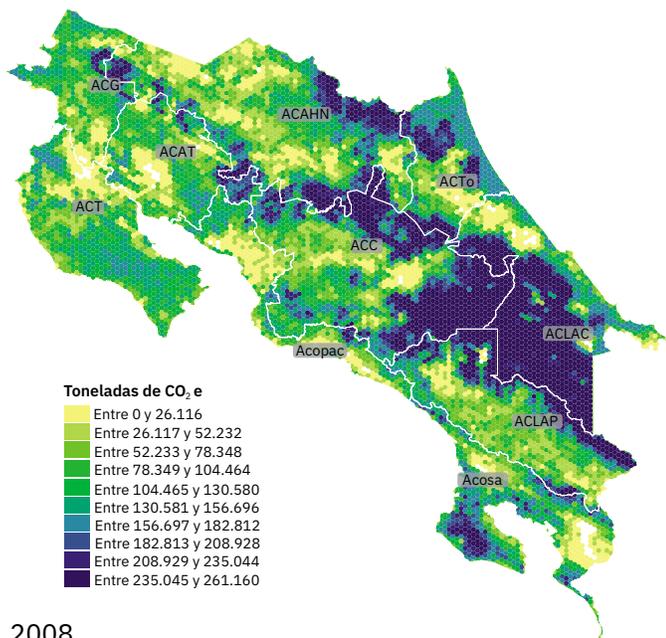
Aunque los patrones generales analizados se han mantenido en el tiempo, son resultado de una combinación de pérdidas y ganancias en los depósitos de carbono en distintas regiones y momentos. Las dos áreas con mayor aporte, ACLAC

Mapas 4.6

Costa Rica: depósitos de carbono según áreas de conservación^{a/}. 1986, 2001, 2008 y 2019
(toneladas de CO₂ equivalente por hectárea)

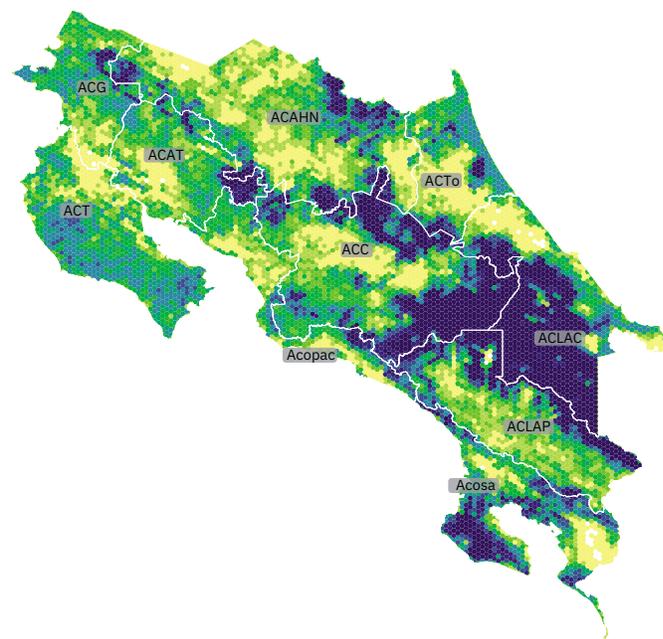
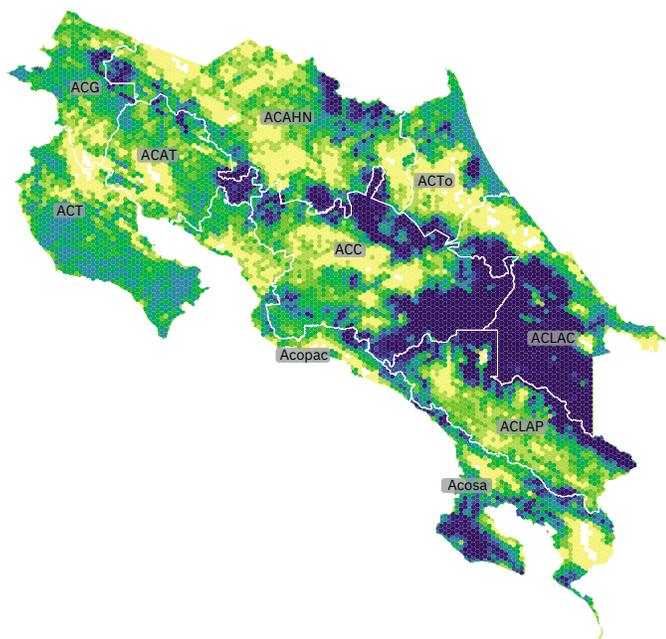
1986

2001



2008

2019



Toneladas de CO₂ e

Entre 0 y 26.116
Entre 26.117 y 52.232
Entre 52.233 y 78.348
Entre 78.349 y 104.464
Entre 104.465 y 130.580
Entre 130.581 y 156.696
Entre 156.697 y 182.812
Entre 182.813 y 208.928
Entre 208.929 y 235.044
Entre 235.045 y 261.160

a/ Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño. Cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se llevan a cabo mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021, con datos de Minae, 2019b.

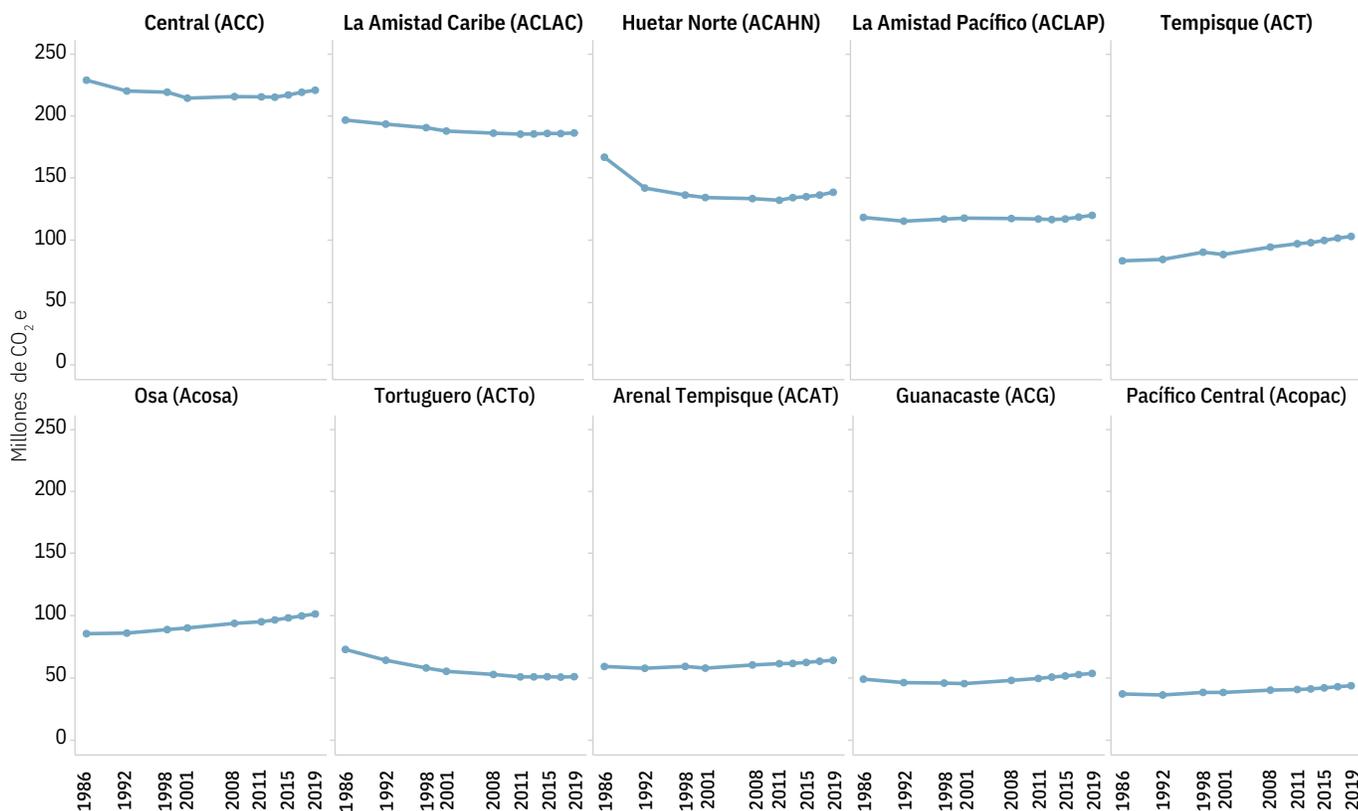
y ACC, registran una tendencia hacia la baja, que se traduce en una pérdida estimada conjunta de 18,5 millones de tCO₂ e (gráfico 4.6). Si en el mapa ante-

rior se comparan las cohortes de 1986 y 2019, se evidencia una transición hacia valores bajos en zonas ubicadas en áreas urbanas, como el Valle Central y sus alre-

dedores; además, se percibe la pérdida de depósitos cerca de los límites de algunos parques nacionales, como La Amistad, Chirripó y Braulio Carrillo.

Gráfico 4.6

Evolución de los depósitos de carbono, por área de conservación



Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021, con datos de Minae, 2019b.

También destacan dos áreas donde la reducción en los depósitos de carbono es aún más marcada: Huetar Norte y Tortuguero. En conjunto se estima que su pérdida fue de 50,2 millones de tCO₂e entre 1986 y 2019, como resultado de considerables tasas negativas de crecimiento al inicio del período (-13,5% en promedio). En el lapso señalado, la primera de estas zonas sufrió una reducción del 16,9%, mientras que en el ACTo fue de un 30,3%. Así, sectores ubicados en el noreste del territorio nacional, que al inicio de la serie presentaban los valores más elevados de densidad de carbono por hectárea, sufrieron pérdidas significativas en el 2019. Los datos muestran que esos depósitos de carbono no se han logrado recuperar con el paso del tiempo, y también se identifica una reducción en los alrededores de las áreas protegidas, en este caso de los refugios de vida silvestre Maquenque y Barra del Colorado.

En los casos de Acosa, ACT y Acopac, se registra un aumento en el *stock* de carbono, con tasas de crecimiento positivas a lo largo de casi todo el período (en promedio 1,9%, 2,4% y 1,9%, respectivamente), para un aumento promedio en el 2019 de 20,2% respecto de 1986. Estos cambios se perciben, por ejemplo, en las penínsulas de Osa y en Nicoya. En la primera, responden a una amplia cobertura de su territorio con áreas protegidas; mientras que, en la segunda, el incremento se produce fuera de estos espacios.

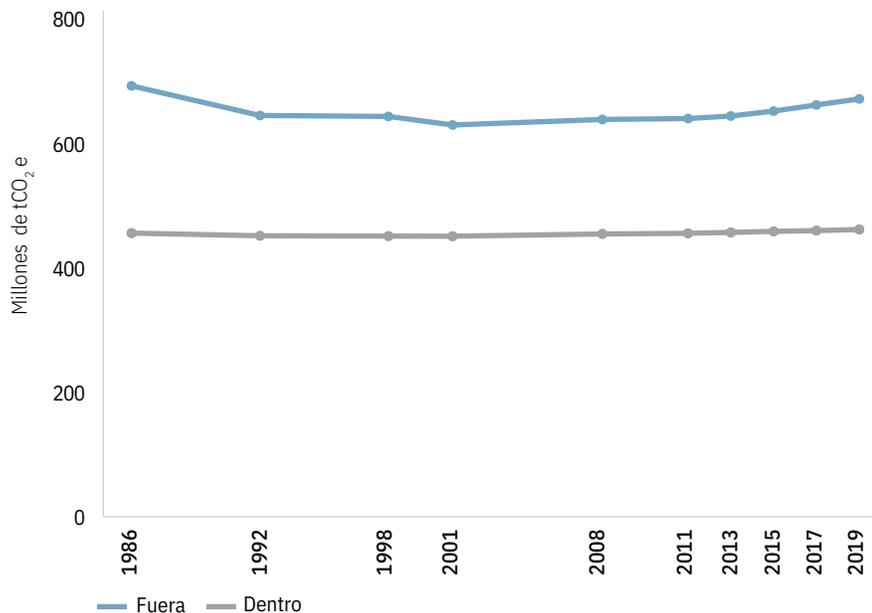
Estas asimetrías territoriales contribuyen a explicar el resultado temporal del conjunto, pues se produjo un efecto de compensación entre pérdidas y ganancias. Además, se evidencia que hay zonas más sensibles: la reducción de cobertura forestal repercute más en términos de pérdida de depósitos forestales de carbono, debido al tipo bosque que albergan (mayoritariamente primario) y a su estrato.

Por ejemplo, la pérdida de bosques en zonas de alta densidad de carbono, en el norte del territorio nacional, tuvo un efecto importante en la reducción del *stock* nacional, principalmente al inicio del período analizado. Estas existencias no se han recuperado y por eso las estrategias de gestión forestal son esenciales en la zona, tanto para frenar la pérdida de carbono como para restablecerla.

Finalmente, el análisis espacial de las existencias de carbono evidencia el papel relevante de las áreas protegidas en esta materia. Aunque estas representan el 25,5% del territorio continental, entre 1986 y 2019 aportaron, en promedio, el 35,6% de las hectáreas de bosque y el 40,7% de los depósitos de carbono. Además, muestran el comportamiento más estable en su *stock* a lo largo del período (gráfico 4.7). Esto evidencia su importancia en las estrategias de mitigación del cambio climático.

Gráfico 4.7

Evolución de los depósitos forestales de carbono dentro o fuera de áreas silvestres protegidas



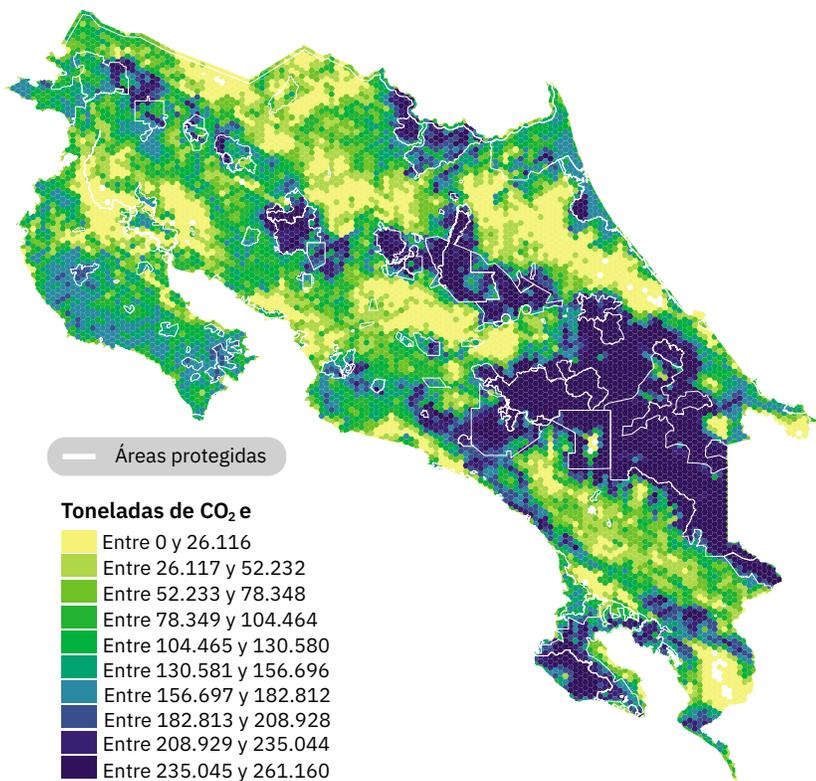
Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021, con datos de Minae, 2019b.

Los territorios que están fuera de áreas protegidas albergan, en promedio, el 64,4% de los bosques del país, y aportan la mayor parte del *stock* de carbono nacional, una media de 59,3% en el lapso 1986-2019. No obstante, muestran una tendencia menos estable que la observada dentro de las zonas de resguardo, lo que evidencia las presiones a las que están sometidos, y explica su comportamiento fluctuante. Así como se registra, en esos territorios, la pérdida de depósitos de inicio del período, también se identifica la recuperación de esas existencias en la última década analizada. El mapa 4.7 muestra la existencia de espacios de altas densidades de carbono (tonos azules) ubicados fuera de territorios protegidos, por ejemplo, en la Cordillera de Talamanca y en el Área de Conservación de Osa.

En suma, el análisis muestra que una parte importante de las ganancias del *stock* de carbono nacional de los últimos años se obtuvo fuera de áreas protegidas o en su periferia, lo que permite deter-

Mapa 4.7

Costa Rica: depósitos forestales de carbono y áreas silvestres protegidas^{a/}. 2019
(toneladas de CO₂ equivalente por hectárea)



a/ Para efectos de visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño, cada hexágono abarca 586,6 hectáreas. Sin embargo, todos los procesamientos se realizan mediante el análisis espacial píxel a píxel.
Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021, con datos de Minae, 2019b.

Recuadro 4.4

Escenario de depósitos de carbono ajustado según densidades de carbono en áreas protegidas

Un estudio en desarrollo (Obando et al., 2021) analiza las existencias de biomasa de los bosques con datos del INF y encuentra que, en las áreas protegidas, se duplican en bosques secundarios y, en los primarios, son más del doble en comparación con los ubicados fuera de estos espacios. Si se replican los ejercicios presentados en este capítulo con la consideración de este ajuste, se observan variaciones en las tendencias temporales y espaciales del *stock* nacional de carbono, que se resumen para su consideración (ver desarrollo del ejercicio ajustado en Durán Monge y Aragón, 2021).

De acuerdo con este escenario ajustado, las existencias de carbono en el nivel nacional durante el período 1986-2019 son considerablemente menores, en relación con las estimadas por Durán Monge y Aragón (2021) con los datos del nivel de referencia REDD+. La diferencia se estima en 322,9 millones de tCO₂ e, es decir, un 30,6% menos (gráfico 4.8). El comportamiento temporal presenta un patrón similar al de los resultados propuestos

anteriormente, sin el ajuste. Es relevante dar seguimiento a estas conclusiones, pues podrían implicar revisiones de otros datos nacionales, entre ellos, el inventario nacional de emisiones.

Este escenario muestra que los bosques en áreas protegidas aportaron, en promedio, 442,2 millones de tCO₂ e, que corresponden al 60,5% del *stock* nacional de carbono. Esto significa una diferencia de 19,8 puntos porcentuales si se contrasta con los valores estimados con base en los datos de REDD+. En otras palabras, en este escenario el patrón de concentración espacial dentro de áreas protegidas es mayor, pues, aunque estas representan apenas el 25,5% de la superficie terrestre nacional, aportan el 60,5% de las existencias de carbono.

Con este cálculo, el aumento en los niveles de concentración espacial es muy visible, pues los valores altos de depósitos de carbono se circunscriben exclusivamente a los límites de las áreas protegidas. Por este motivo, la ubicación de esquemas de resguardo de gran extensión, dentro de los límites de las

áreas de conservación Central y La Amistad Caribe, posiciona estas áreas como las de mayor aporte en el *stock* nacional de carbono, con una contribución conjunta de 40,5%.

En este escenario, la comparación entre la ubicación y el nivel de depósitos, entre 1986 y 2019, también evidencia la pérdida de existencias en zonas de alta densidad de carbono por hectárea, como el área de conservación Tortuguero, con una tasa de crecimiento promedio negativa de un -3,2% que, en los primeros años de la serie, alcanzó su valor más elevado de -10,1%. También se observa una reducción en sectores caracterizados por menores densidades de carbono, como el Valle Central, el área de conservación Huetar Norte y el sector sur de Tortuguero. Asimismo, la recuperación de depósitos forestales de carbono en las penínsulas de Nicoya y Osa se refleja en este escenario, por lo cual las áreas de conservación de Osa y Tempisque aumentaron su aporte.

Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021.

minar el riesgo que significa el estatus de esas zonas, y tomar medidas de política pública y conservación. Para lograrlo es clave ampliar la información, con métodos que incluyan trabajo de campo y permitan definir los factores que explican esta recuperación e identificar posibles amenazas.

Como aporte adicional, durante el desarrollo de esta investigación se conoció un estudio en proceso (Obando et al., 2021), que analiza las existencias de biomasa de los bosques mediante datos del INF. De manera preliminar, ese trabajo encuentra diferencias entre las existencias de carbono de los bosques, según estén ubicados dentro o fuera de áreas protegidas. Esas diferencias no están contempladas en los datos oficiales de REDD+ utilizados en el presente

capítulo. Pero, con el fin de aprovechar ese trabajo se llevó a cabo un ejercicio exploratorio (recuadro 4.4) de estimación de los depósitos de carbono en el territorio nacional, y se esbozó un escenario en el cual se ajustan las existencias de carbono de los bosques según las diferencias en la biomasa reportadas por Obando et al. (2021).

Emisiones y remociones de carbono por cambios en uso forestal: balance positivo, pero con presiones

Los cambios en el uso del suelo, específicamente los que representan modificaciones en la cobertura forestal, se traducen en pérdidas y ganancias del *stock* nacional de carbono. Su análisis permite estimar las emisiones y remo-

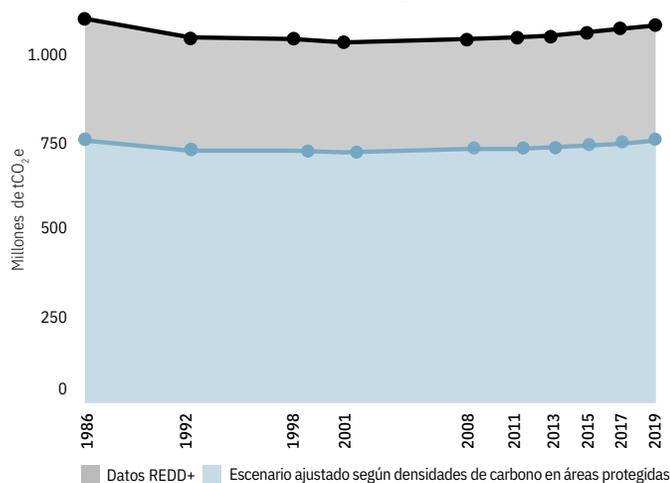
ciones de CO₂ hacia la atmósfera y desde ella. Un aumento en las existencias de carbono se considera una remoción, y una pérdida en los depósitos representa una emisión. Estos flujos y su asociación con los usos concretos del suelo se exploran espacial y temporalmente con la serie histórica de mapas de cobertura, lo que permite advertir los efectos de la actividad humana sobre el comportamiento de esos campos.

El análisis muestra un balance positivo del territorio forestal como sumidero de carbono (reservorio que acumula y almacena el carbono secuestrado) desde el 2002 hasta el 2019. En primer término, se registró una reducción importante de las emisiones por deforestación; esas emisiones pasaron de 13 millones de tCO₂ e en 1986 a 1,1 millones de tCO₂ e

Gráfico 4.8

Evolución de los depósitos de carbono según datos de REDD+^{a/} y escenario ajustado por densidades de carbono en áreas silvestres protegidas

(millones de toneladas de CO₂ equivalente)

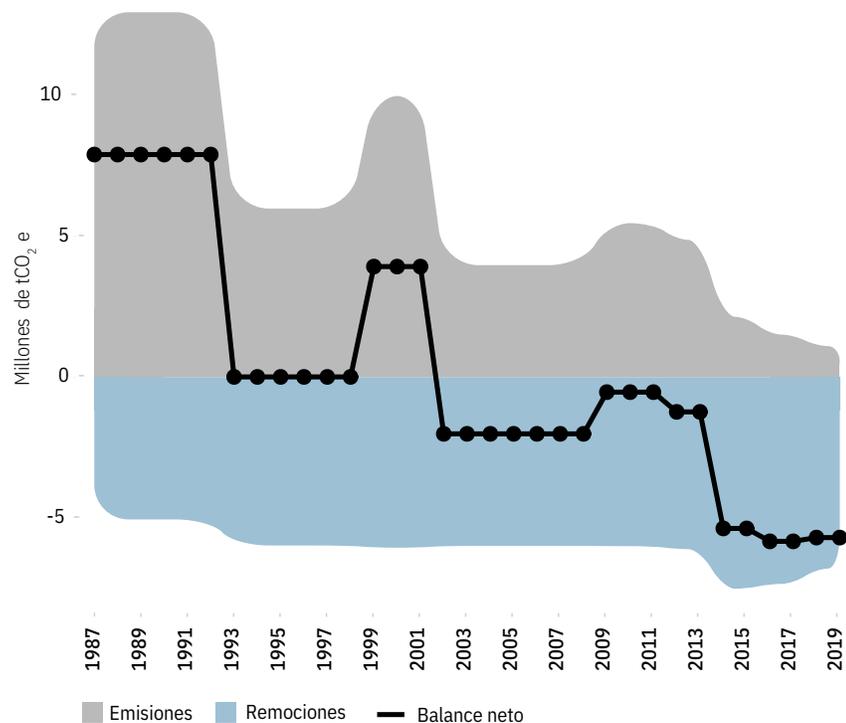


a/REDD+ es un marco respaldado por las Naciones Unidas que apunta a frenar el cambio climático al detener la destrucción de los bosques. REDD significa "Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y la Degradación de los bosques"; el símbolo + implica que en su implementación hay componentes de conservación, gestión sostenible de los bosques con participación de población local y aumento de las reservas forestales de carbono (Conservación Internacional, 2019).

Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021 con datos de Minae, 2019b y Obando et al., 2021.

Gráfico 4.9

Evolución de las emisiones por deforestación, remociones por reforestación y crecimiento forestal y balance neto. 1987-2019



Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021, con datos de Minae, 2019b.

e en 2019, los niveles máximo y mínimo de toda la serie (gráfico 4.9). Además, se pueden notar dos picos durante los períodos 1987-1992 y 1999-2001, y uno de menor magnitud en el lapso 2009-2011 que, como se verá más adelante, están vinculados con intervenciones antropogénicas. Las remociones muestran un comportamiento más estable, con una tendencia hacia el alza a lo largo de la serie y con un promedio estimado de 6,1 millones de tCO₂ e. El balance final se sustenta principalmente en la reducción de las emisiones por deforestación y por el mantenimiento de un nivel constante de remociones; es decir, no se han logrado aumentos significativos en la capacidad de absorción entre 1986 y 2019.

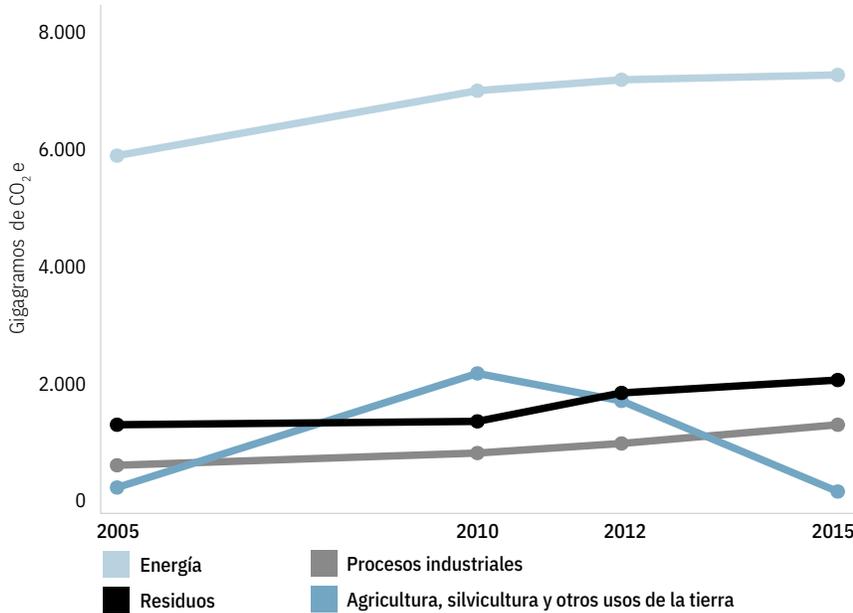
En este análisis sobre el equilibrio interno del sector forestal, sus emisiones y remociones, no se considera la emisión de gases provocada por otros sectores del país, que son parte del carbono secuestrado por estos territorios, pero no derivan de este (por ejemplo, las emisiones por consumo de combustibles). Según datos del Inventario Nacional de Emisiones de GEI (IMN, 2019) Costa Rica está lejos de mostrar un balance positivo en otras fuentes (gráfico 4.10). En energía, industria y manejo de residuos se observa un aumento de las emisiones a través del tiempo. Es importante considerar que dentro del sector agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, los bajos niveles se derivan del resultado positivo del sector forestal. Esos resultados demuestran una importante disociación entre las políticas de reducción de emisiones del sector forestal y las del resto de sectores.

Las emisiones por deforestación no se han distribuido de manera homogénea en el territorio. El área de conservación Huetar Norte presentó los niveles más altos y concentró el 26,6%. Le siguen el área Central (15,7%), La Amistad Pacífico (10,9%) y Tortuguero (10%). Los mapas 4.8 muestran el balance neto entre las emisiones por deforestación y las remociones, al inicio y al final de la serie, cuando se alcanzan los valores extremos en ambos indicadores.

Entre 1987 y 1992, cuando se presentó la mayor cantidad de emisiones por causa de la deforestación en la serie, hubo una

Gráfico 4.10

Evolución de las emisiones de gases efecto invernadero, según sector



Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021 con datos IMN, 2019.

afectación generalizada en todo el país. Sin embargo, la mayor parte se concentró en el área de conservación Huetar Norte (32,1%), seguida de las áreas Central (14,1%) y Tortuguero (10,3%). En 2019 el patrón cambia: los niveles de emisiones son considerablemente menores y los valores altos se ubican principalmente en el Valle Central (25,7%).

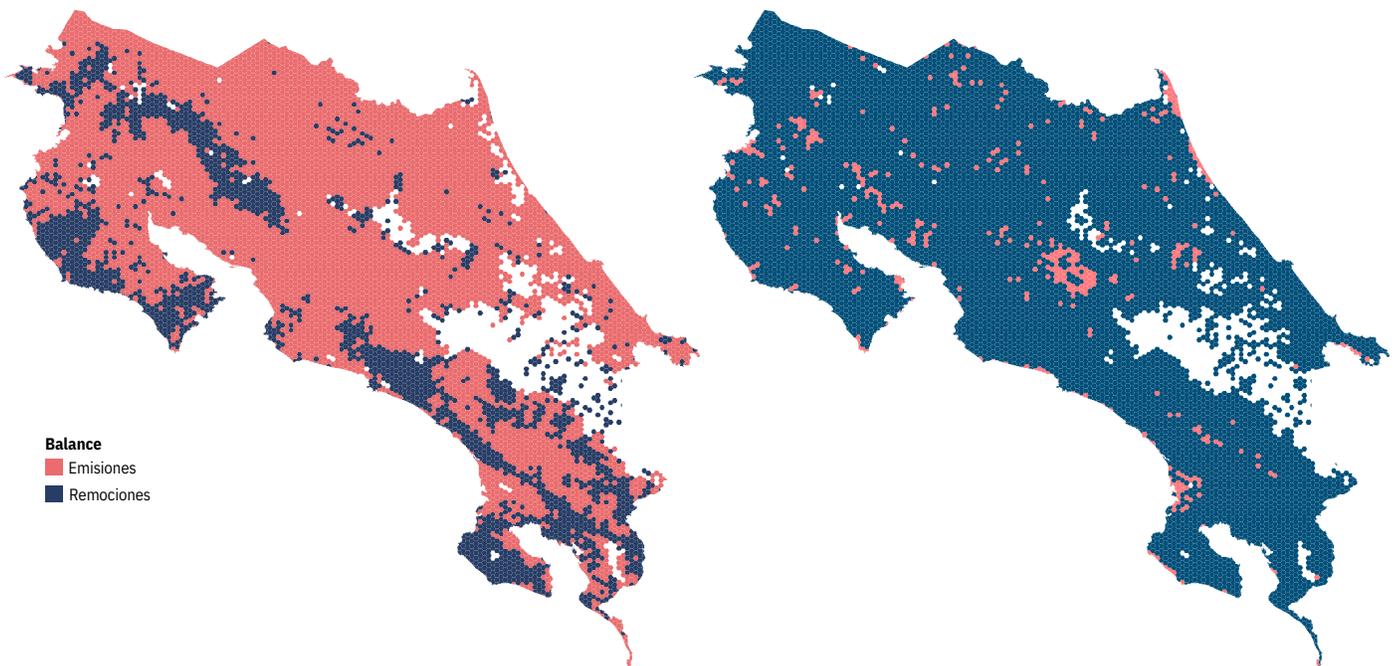
Las remociones muestran una tendencia a la concentración en el período 1987-1992, con valores altos en la península de Nicoya, cordilleras de Guanacaste y Tilarán, y la península de Osa. No obstante, en 2019 las remociones se encuentran dispersas en el país. En Durán Monge y Aragón (2021) se pueden consultar mapas exclusivos para las emisiones y para las remociones en este período. El resultado de estos patrones es la transformación de un balance dominado por las emisiones al inicio de la serie hacia un dominio de las remociones, como se observa en el mapa anterior.

Mapas 4.8

Costa Rica: balance neto de emisiones por deforestación y remociones de carbono^{a/}. 1987 y 2019

1987

2019



a/ Los resultados comprenden información analizada en distintos períodos; por eso fue anualizada con el fin de comparar distintos momentos. Para visualizar gráficamente esta información, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño (586,6 hectáreas). Sin embargo, los procesamientos se realizan mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021 con datos de Minae, 2019b.

Este análisis implica tres grandes flujos. Por un lado, las remociones por reforestación, es decir, las absorciones de CO₂, derivadas de la sustitución de otros usos por bosques, que dan lugar a un aumento del *stock* de carbono (nuevos bosques secundarios). En segunda instancia, las remociones por bosques secundarios que se mantienen como bosques a través del tiempo, y como resultado de su crecimiento se convierten en sumideros que captan CO₂ y aumentan gradualmente sus existencias de carbono. En tercer lugar, las emisiones generadas por la deforestación y por la sustitución de bosques por otros usos. En 1986 la composición de las remociones era de un 20,9% por reforestación y un 79,1% por bosques que se mantienen y crecen. Para el final del período, estas últimas son las más importantes, pues en 2019 representaron el 99,6% de las remociones.

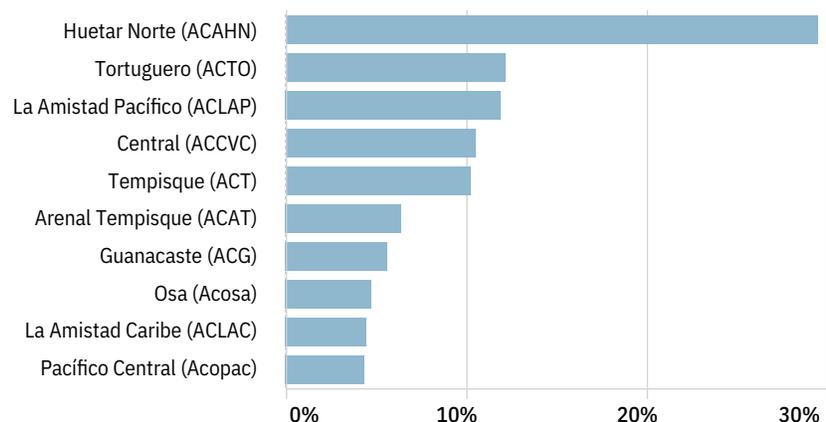
Es importante analizar el aporte que han tenido las perturbaciones de origen antropogénico en la pérdida de depósitos de carbono. La sustitución de bosques por pastos es la principal causa de las emisiones por deforestación durante el lapso objeto del análisis: un total de 146,9 millones de tCO₂ e y un aporte del 70,9%. En segundo lugar, están los cultivos, con un total de 39,5 millones de tCO₂ e, que equivalen al 19,1% de las emisiones totales. La deforestación por sustitución de bosques para desarrollo urbano ha aportado el 1,4% del total de emisiones por cambio de uso forestal.

En términos espaciales, se analizaron los patrones de las emisiones por deforestación asociadas con la ganadería y la agricultura, durante los momentos más relevantes en cada caso. En el período analizado, las emisiones derivadas de la pérdida de bosques por sustitución hacia pastos se concentraron mayoritariamente en el área Huetar Norte (29,5% del total). Las áreas de Tortuguero, La Amistad Pacífico, Central y Tempisque presentaron una afectación relativamente menor, pero considerable, con valores que oscilan entre 10,3% y 12,2% (gráfico 4.11a). En el caso de las emisiones por deforestación asociadas con cultivos (gráfico 4.11b), el mayor aporte fue el de la región Central (29%), seguida de cerca por la Huetar Norte (26,1%).

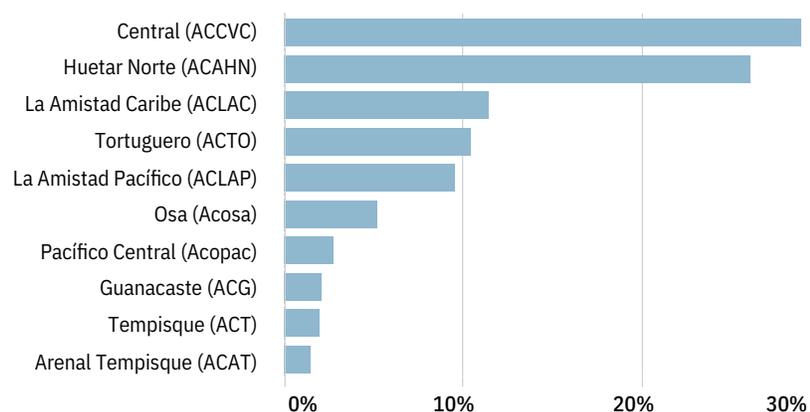
Gráfico 4.11

Porcentaje de las emisiones por deforestación, según área de conservación y tipo de uso del suelo

a) Deforestación asociada con pastos



b) Deforestación asociada con cultivos



Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021 con datos de Minae, 2019b.

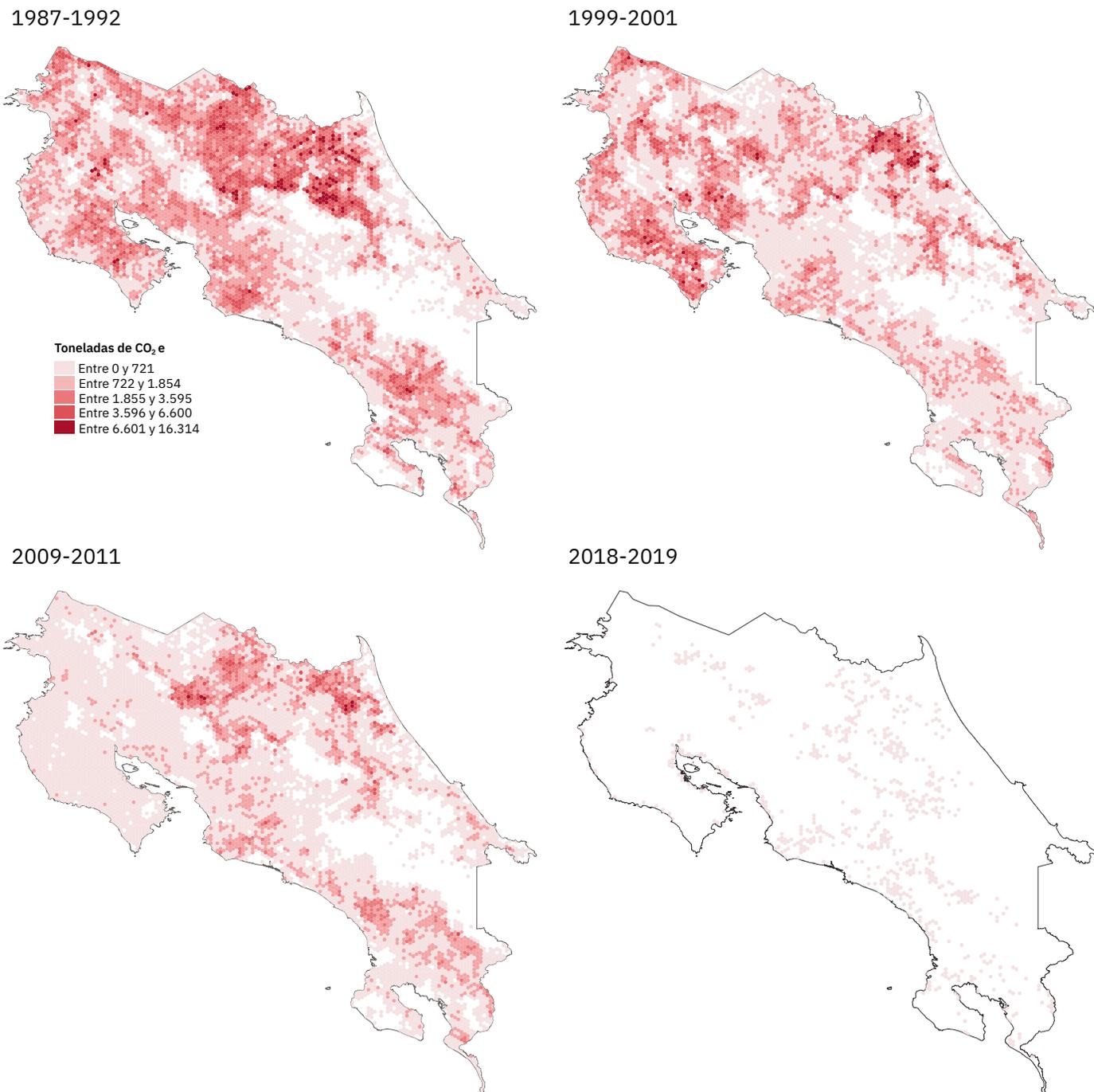
En cuanto a la sustitución de bosques por pastos, cuando se produjo el máximo nivel de emisiones (1986-1992) estas alcanzaron un alto grado de concentración en el área de conservación Huetar Norte, con un aporte de 35,6%, mientras que, en las otras áreas, el aporte no superó el 10,8% (mapas 4.9). Durante el segundo incremento de las emisiones, que ocurrió entre los años 1999 y 2001, la región Huetar Norte continuó como la mayor responsable de ellas (20,4%), pero en el área Tempisque, específicamente en el golfo de Nicoya, las emisiones aumentaron y contribuyeron con el 19,4% del total nacional. Durante el último

incremento y el resto de la serie histórica, el área Huetar Norte mantuvo el protagonismo en las emisiones por deforestación.

En emisiones por cambio de bosques a cultivos, el nivel más alto se alcanzó entre 1987 y 1992 (mapas 4.10), en especial en las áreas Huetar Norte (28,8%), Central (27,7%) y Tortuguero (14%). Entre 1999 y 2001 se concentran en el área Central (41,1%); en Turrialba y Jiménez, occidente del Valle Central, Aserrí, Tarrazú y Dota; también se dio un foco en La Amistad Caribe. El tercer pico se alcanza entre 2014 y 2015, y obtiene los niveles más altos en el área Huetar Norte (47,1%).

Mapas 4.9

Costa Rica: emisiones por deforestación derivadas de la sustitución de bosques por pastizales^{a/}



a/ Los resultados abarcan información analizada en distintos periodos. Por tanto, fue anualizada para efectos de comparabilidad entre momentos. Para visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño (586,6 hectáreas). Sin embargo, los procesamientos se realizan mediante el análisis espacial píxel a píxel.

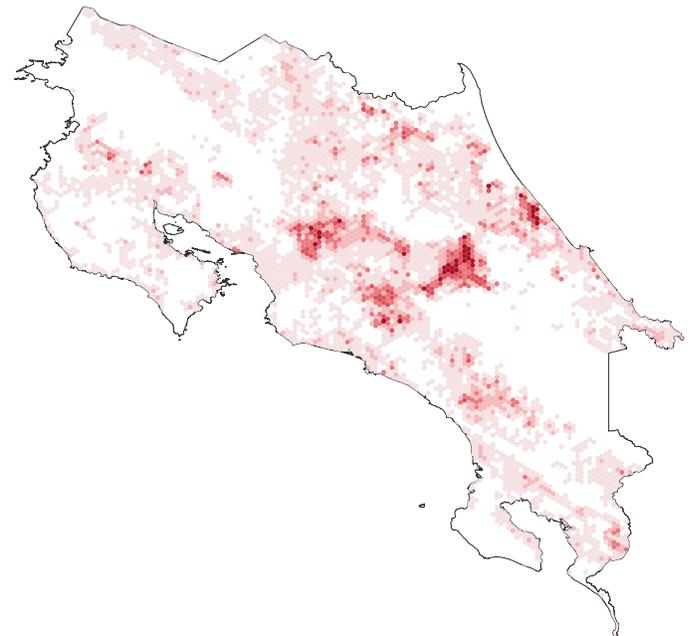
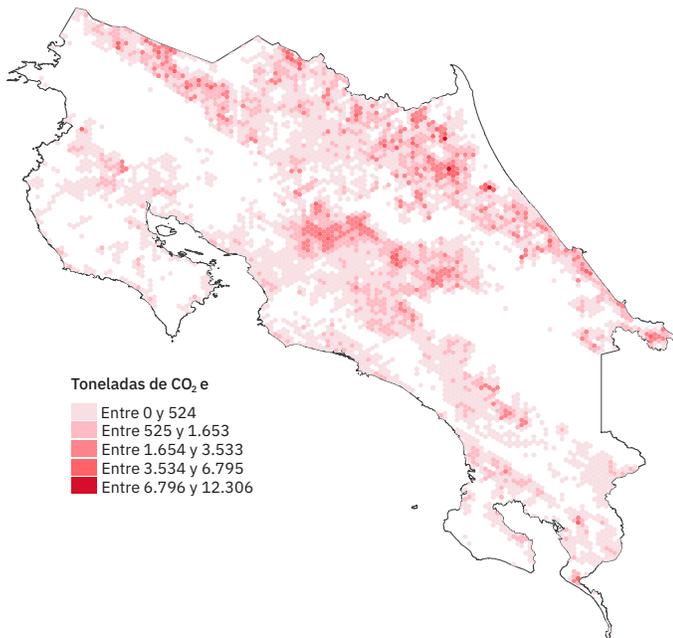
Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021 con datos de Minae, 2019b.

Mapas 4.10

Costa Rica: emisiones por deforestación derivadas de la sustitución de bosques por cultivos^{a/}

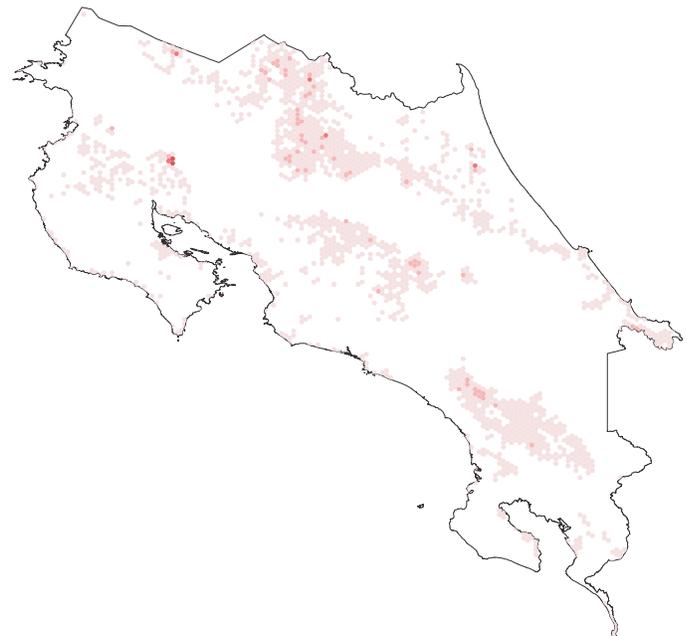
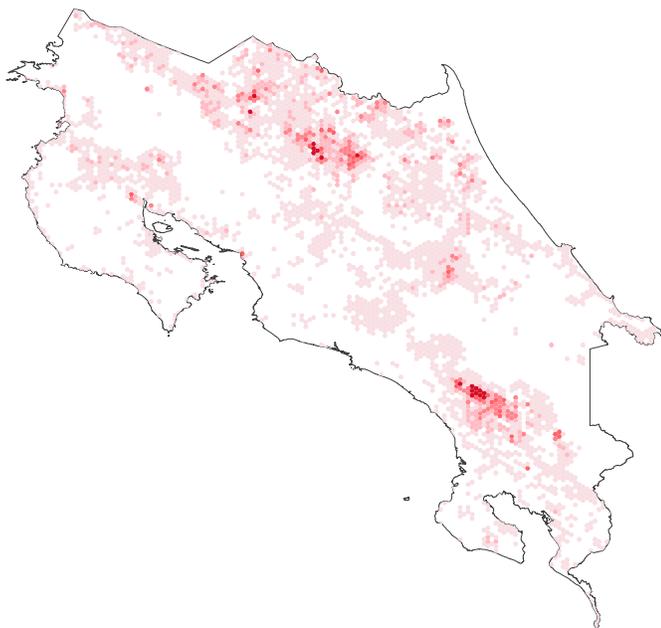
1987-1992

1999-2001



2014-2015

2018-2019



a/ Los resultados abarcan información analizada en distintos periodos. Por tanto, fue anualizada para efectos de comparabilidad entre momentos. Para visualización, los resultados se agrupan espacialmente en hexágonos de igual tamaño (586,6 hectáreas). Sin embargo, los procesamientos se realizan mediante el análisis espacial píxel a píxel.

Fuente: Durán Monge y Aragón, 2021 con datos de Minae, 2019b.

Los resultados del análisis espacial y temporal de las emisiones provocadas por cambios en el uso del suelo forestal hacia pastos y agricultura evidencian que, pese al balance positivo que el sector ha tenido, los bosques y los depósitos de carbono han sufrido importantes presiones durante el período en estudio. En algunas zonas, esto ha impactado su potencial de mitigación del cambio climático. Por ejemplo, las áreas de conservación Huetar Norte y Tortuguero sufrieron pérdidas de sumideros de altos niveles de densidad de carbono y, en algunos momentos, fueron afectadas por una intensa generación de emisiones asociadas a la actividad agropecuaria.

Predicción de pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica entre 2021 y 2025

Como complemento de las secciones anteriores, una investigación realizada para este capítulo (Rodríguez, 2021) aprovecha metodologías novedosas para aplicar un instrumento de predicción de la pérdida de cobertura arbórea (tal como se define adelante), con precisión espacial. Lo anterior con base en herramientas de aprendizaje automático (*machine learning*) y diversas variables de interés para mapear, analizar y explicar el riesgo de deforestación.

Como se vio anteriormente, desde hace varias décadas se ha logrado contener la deforestación en gran medida y estimular la recuperación de los recursos forestales. Esto a partir de normas (entre otras, la prohibición del cambio de uso del suelo en bosques de la Ley Forestal n° 7575) o incentivos (como el pago por servicios ambientales). Pero lo anterior no evita que persistan presiones que vulneran la sostenibilidad de los logros. En la crisis actual, derivada de la pandemia por covid-19, estas pueden escalar (Chacón y Merino, 2021), así como por cambios en los patrones productivos, de crecimiento urbano y de comercio del país.

Esta sección determina la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el lustro 2021-2025, a partir del aprendizaje del comportamiento pasado (período 2000-2020), y según un conjunto de

variables: la capacidad de uso del suelo, las características geográficas, el ángulo de la pendiente del terreno, el costo de la tierra, el tipo de bosque, la presencia de esquemas de protección y el nivel de desarrollo, entre otras. La herramienta aplicada permite conocer la ubicación de las zonas más propensas a perder cobertura arbórea en el corto plazo, lo que no se ha identificado antes en el país y es relevante para la política pública.

El estudio parte de una revisión de la pérdida de cobertura en décadas pasadas, que permite identificar factores que la impulsaron y que tienen componentes que pueden representarse como una serie de tiempo en capas geográficas. Esta información permite crear modelos estadísticos basados en datos que “aprenden” de comportamientos anteriores, y predecir la magnitud y ubicación de la posible pérdida de cobertura arbórea futura. Modelos de esta categoría se han aplicado en diferentes partes del mundo como Borneo, Belice, Indonesia y Vietnam, entre otros. Históricamente el más utilizado es la regresión logística (Cushman *et al.*, 2017). Sin embargo, debido a los avances en la capacidad de procesamiento informático y en las técnicas de aprendizaje automático, es posible implementar otros métodos con un grado mayor de complejidad, que resulten en predicciones más precisas.

Por las características de la base de datos y de la metodología, las predicciones se limitan a un horizonte de cinco años. Además, por la forma de capturar los datos puede incluirse alguna proporción de otras coberturas diferentes de los bosques, por lo cual este estudio adopta el concepto de “cobertura arbórea”. Es importante aclarar que este ejercicio no considera la recuperación o regeneración forestal, ni el resultado neto entre pérdidas y ganancias; por su naturaleza, el objetivo es específicamente la predicción de pérdida futura, entendiendo que esta genera un riesgo concreto para cada territorio. Los detalles de procedimiento se sintetizan en el recuadro 4.5 y se exponen con detalle en el Anexo Metodológico al final de este capítulo y en Rodríguez, 2021.

Costa Rica perdería un 1,4% de su cobertura arbórea en el 2025

El primer paso para contextualizar y realizar la predicción es contar con fuentes de información que permitan analizar el comportamiento de la pérdida de cobertura arbórea en el pasado, fuente que varía respecto de las utilizadas en las secciones anteriores. Según el Global Forest Change (GFC), Costa Rica poseía 39.174 kilómetros cuadrados (km²) de cobertura arbórea en el año 2000. Entre el 2000 y el 2020 se detectó una pérdida de 2.532 km², equivalente a un 6,4% de la cobertura del 2000 (Global Forest Change, 2021). Como se indicó, en este estudio no se considera el balance neto entre esta pérdida y la recuperación; solamente se analiza la trama verde desaparecida como base para este ejercicio de predicción.

La pérdida de cobertura arbórea puede ocurrir por múltiples causas: eventos hidrometeorológicos, deslizamientos o variaciones climáticas, por ejemplo. También, detonantes antropogénicos como la deforestación, la rotación y la corta de cultivos, incendios inducidos y otros cambios de uso del suelo. Después de entrenar, validar y probar un algoritmo de aprendizaje automático, se estimó la probabilidad de perder la cobertura arbórea durante el período 2021-2025 en todo el territorio nacional, en áreas de 30 por 30 metros, con base en el comportamiento mostrado en veinte años y en características actuales de la zona. A cada uno de esos puntos espaciales, con presencia de cobertura arbórea, se asoció una probabilidad o nivel de riesgo de perderla en el futuro.

Según el modelo predictivo, se espera que entre 2021 y 2025 ocurra una pérdida de cobertura arbórea cercana a los 515 km² en todo el país, que corresponde a un 1,4% de la existente en la actualidad. La predicción muestra un escenario positivo, en relación con los niveles de pérdida bruta registrados en el pasado. De hecho, es un 24% menor respecto al quinquenio anterior (gráfico 4.12), inferior al promedio de las últimas dos décadas (633 km²) y mucho menor que los promedios, por quinquenio, en la región centroamericana en ese mismo

Recuadro 4.5

Aspectos metodológicos: predicción de la pérdida de cobertura arbórea con aprendizaje automático

En esta investigación se realizó un procedimiento para entrenar, validar y aplicar un algoritmo de aprendizaje automático supervisado, que predice la pérdida de cobertura arbórea durante el período 2021-2025 en Costa Rica, mediante la identificación de relaciones multivariadas complejas. Los detalles del procedimiento se presentan en el Anexo Metodológico al final de este capítulo.

Para elaborar el análisis se utilizaron diferentes bases de datos de acceso público. La más relevante es la del Global Forest Change (GFC), publicada originalmente por Hansen *et al* (2013) y mantenida por la GFC (2021). La selección de esta fuente respecto de otras posibles se relaciona, entre otros aspectos, con el hecho de ser de acceso público, contar con datos de la cobertura arbórea global durante las últimas dos décadas, con una frecuencia anual y con una resolución de 30 por 30 metros. Esa base se construyó con las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y, desde el 2013, con Landsat 8. La predicción se realizó para la plataforma continental costarricense.

Por cobertura arbórea se toman aquellas áreas de 30 por 30 metros que cuentan con vegetación de una altura mayor a cinco metros y esta cubre más del 30% de la superficie. Por razones metodológicas en la captura de la información de base, es importante mencionar que pueden incluir otros tipos de cobertura no forestal. Esta fuente está sujeta a grados de incertidumbre propios de los procesos de clasificación

y, por ende, es de esperar que no todas las zonas estén correctamente clasificadas. A pesar de ello, la base de datos tiene una precisión -en la clasificación de bosque/no-bosque para el umbral elegido en el estudio- del 80% y es la mejor en comparación con otras dos bases analizadas por Cunningham *et al.*, (2019) en Costa Rica.

También se recopiló información relevante de otras fuentes, como el índice de desarrollo social (Mideplan, 2017, 2013, 2007 y 2001), la capacidad del uso del suelo (Fundación Neotrópica-CEAP, 1995) y datos de elevación (NASA, 2007), pendiente (NASA, 2007), cercanía a carreteras (Open Street Map, 2021), ríos y poblados (ITCR, 2014), entre otros.

La información fue transformada mediante un mecanismo denominado *ingeniería de variables* y agrupada por quinquenios para favorecer el aprendizaje automático, que consiste en un proceso en el que se les “enseña” a las computadoras, mediante el uso de algoritmos y modelos estadísticos, a aprender y actuar sin estar explícitamente programadas para eso.

En total se generaron 41 variables, que son el insumo para el algoritmo predictivo. Posteriormente se entrenó, validó y probó un algoritmo denominado “*Light Gradient Boosting Machine*” (Ke *et al.*, 2020), que implementa un ensamble de tipo *boosting*, que consiste en la aplicación de gradientes descendientes en “árboles de decisión”; es decir, combina modelos sencillos de manera iterativa para generar una mejor predicción.

El proceso de entrenamiento está compuesto por varias iteraciones que buscan mejorar los resultados en conjuntos de datos específicos. En este caso, se alcanzó un valor área promedio de 0,7 en el territorio nacional bajo la curva-*Receiver Operation Characteristic* (ROC). Esta métrica provee una medida agregada del desempeño del modelo a través de todos los umbrales de clasificación. El área bajo la curva ROC puede tener valores entre 0 y 1, donde 0 representa una clasificación completamente errónea y 1 un modelo perfecto. En este caso, el valor 0,7 indica que el modelo tiene una capacidad predictiva relevante, puesto que se aleja de una predicción aleatoria (0,5), pero que también presenta limitaciones de clasificación, producto de la metodología utilizada, la fuente de información y la naturaleza de los eventos por predecir.

Finalmente, el modelo fue aplicado y sus resultados fueron interpretados para confirmar su correcta ejecución y brindar conocimientos adicionales a las propias predicciones. En esta fase se aplicó la metodología de “Valores *Shapley*” (Lundberg y Lee, 2017) y se caracterizaron las predicciones basadas en variables de interés.

Los conceptos utilizados en esta sección se pueden consultar en el Anexo Metodológico al final de este capítulo y en la investigación de base.

Fuente: Rodríguez, 2021.

período, los cuales -sin contar a Costa Rica- oscilan entre un 2% en Panamá, y un 5,6% en Guatemala (Rodríguez, 2021 con datos del GFC, 2021).

A pesar de que la pérdida esperada es baja en relación con otros períodos y países, sus impactos podrían ser vastos dependiendo de las características del área donde ocurran -bosques, humedales, plantaciones forestales, trama verde urbana, entre otros-. Esta pérdida mal gestionada puede atentar contra los ecosistemas, la cobertura arbórea y sus

comunidades cercanas, limitar las bases para la adaptación y mitigación del cambio climático, afectar la sostenibilidad ambiental, los servicios ecosistémicos y otras implicaciones negativas para el desarrollo humano. Por eso, como se insiste, más allá del resultado neto del país, cada pérdida de cobertura forestal debe ser objeto de análisis.

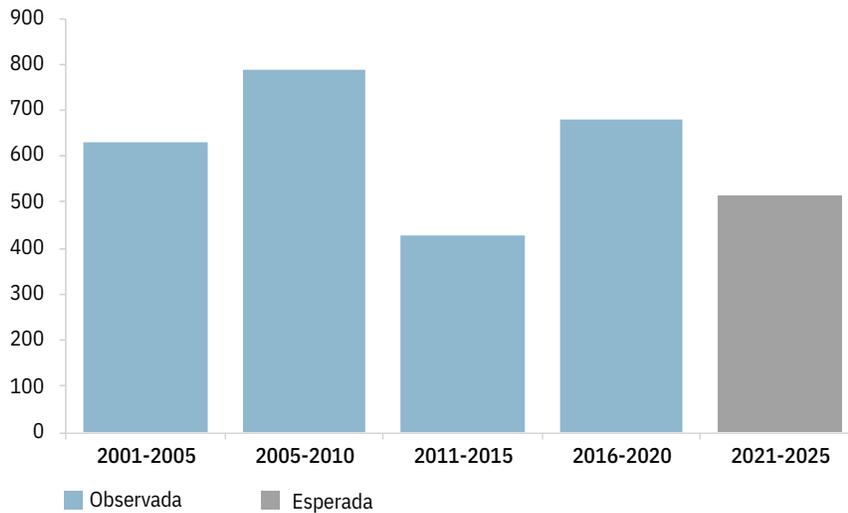
El mapa 4.11 identifica espacialmente la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el período 2021-2025, con una escala de color. Destacan algu-

nos puntos con baja probabilidad, que están asociados a zonas con pendientes elevadas, terrenos con poca vocación agropecuaria y con presencia de áreas protegidas, como los parques nacionales Tortuguero, Braulio Carrillo, La Amistad y Corcovado. Por el contrario, los lugares que presentan mayores posibilidades de perder la cobertura arbórea se concentran en zonas asociadas a bajas pendientes y elevaciones, vocación agropecuaria y presencia de cultivos como la piña, palma aceitera y banano.

Gráfico 4.12

Pérdida observada y esperada de cobertura arbórea en Costa Rica, por quinquenio

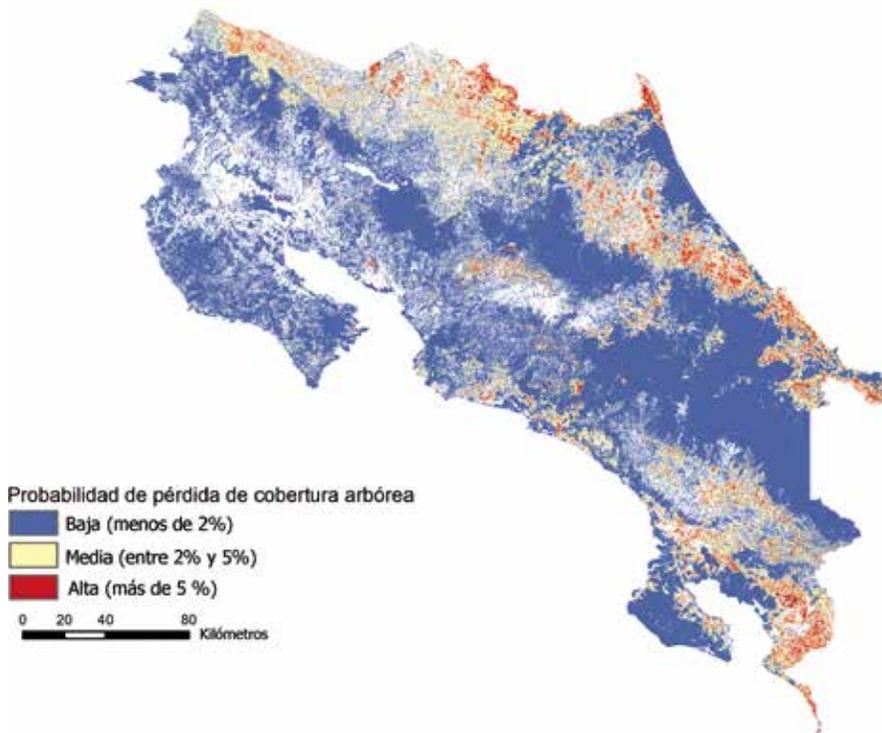
(kilómetros cuadrados)



Fuente: Rodríguez, 2021 con datos del GFC, 2021.

Mapa 4.11

Costa Rica: probabilidad^{a/} de pérdida arbórea en puntos de 30 por 30 metros. 2021-2025



a/El porcentaje refiere a la probabilidad de que un área de 30 por 30 metros pierda su cobertura arbórea en el período 2021-2025.

Fuente: Rodríguez, 2021.

Sobresalen algunas zonas de los cantones de San Carlos, Los Chiles, Pococí, Buenos Aires, Osa, Talamanca, La Cruz, Matina, Siquirres y Guácimo.

Se estima que las pérdidas porcentuales más importantes ocurran en la zona norte y en el Pacífico Sur, que coinciden con las regiones que han perdido mayor proporción de dosel arbóreo en los últimos veinte años. Se cree que en el Pacífico Norte habrá un impacto menor; aunque muestra algunos puntos en alto riesgo, pero muy dispersos en el paisaje. La sección siguiente realiza un desglose de la predicción, y la describe detalladamente según las regiones hidrológicas del país.

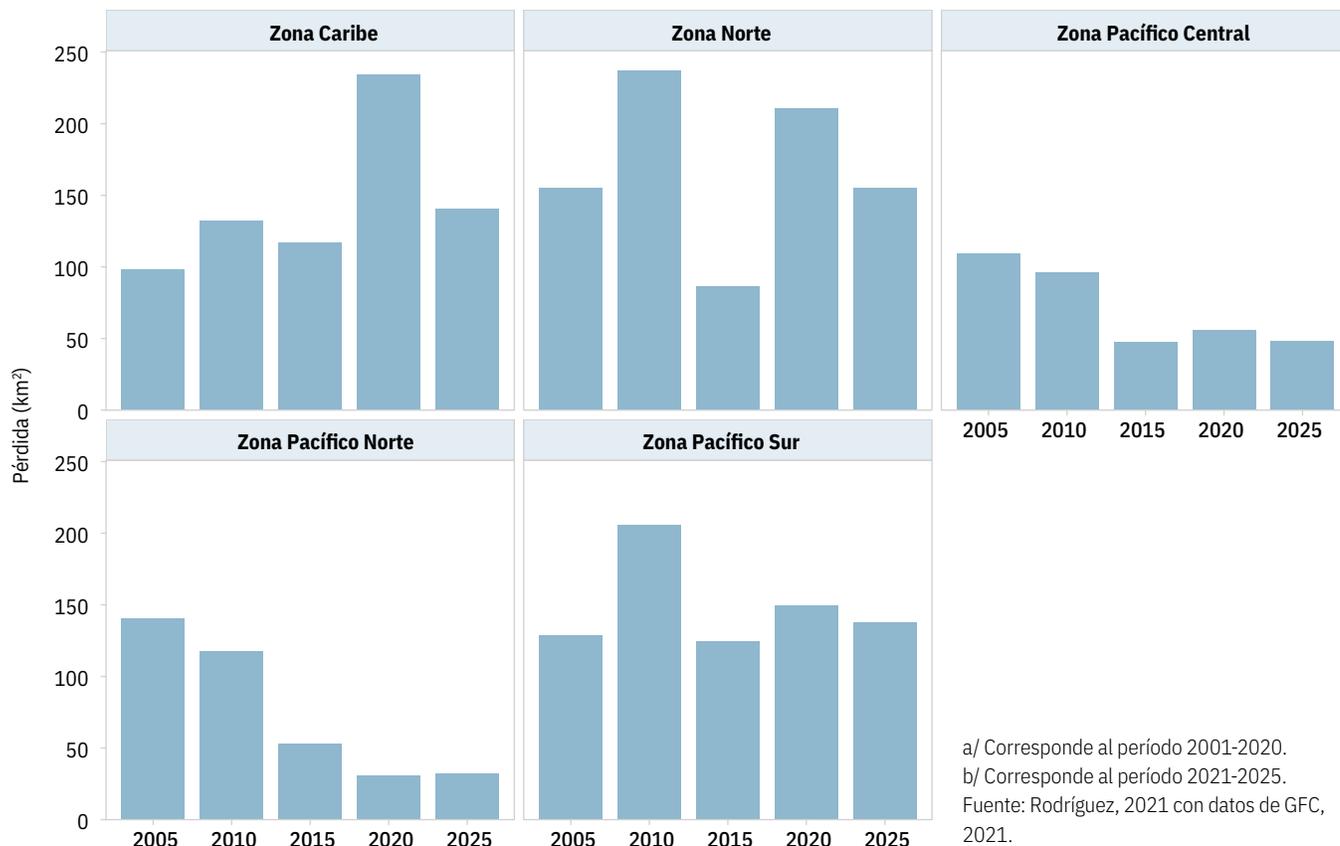
Pérdida estimada de cobertura arbórea varía según región hidrológica

Para lograr una mayor precisión territorial en los resultados anteriores, se desagregó el modelo en el nivel regional. Como se trata de un tema ambiental que aporta significado a las particularidades del estudio, se utilizaron las cinco Unidades Hidrológicas establecidas por la Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía: Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Zona Norte y Caribe. Esta categorización permite un análisis más detallado, obtener métricas y evidencias que fundamenten una gestión particularizada en cada territorio.

En todas las regiones, el modelo predijo una pérdida de cobertura arbórea para el quinquenio 2021-2025 (gráficos 4.13). El dato estimado para la mayoría de las regiones (excepto una) es menor que la pérdida observada en el lustro anterior y, en todas, es menor que el promedio correspondiente al período 2001-2020. La región que presenta una estimación más negativa es la zona norte, en ella se pronostica una disminución del dosel arbóreo de 2,1% (155 kilómetros cuadrados) en el 2025. En el otro extremo, el Pacífico Norte es la zona que menos contribuye a la predicción en términos porcentuales, aunque contradictoriamente, presenta un aumento con respecto a la baja observada en el quinquenio anterior (5,7%).

Gráfico 4.13

Pérdida observada^{a/} y esperada^{b/} de cobertura arbórea, por región hidrológica (kilómetros cuadrados)



El Pacífico Sur es la segunda región con un mayor porcentaje estimado de pérdida de cobertura arbórea (1,7%); un nivel mayor que el promedio nacional y solo superado por la zona norte. En el Pacífico Central la predicción alcanza un 1,2% de pérdida de dosel, inferior al promedio nacional. Y, por último, en el Caribe, se espera una pérdida cercana a los 141 km², un 1,3% de la actual, y también un porcentaje inferior al promedio nacional (1,4%). El pronóstico de cada región se detalla a continuación.

Zona norte: la región que más ha perdido cobertura arbórea, y en la que se espera una mayor pérdida en el futuro

La zona norte posee un área de 10.990 km² que comprende las cuencas: Sarapiquí, Cureña, San Carlos, Pocosol,

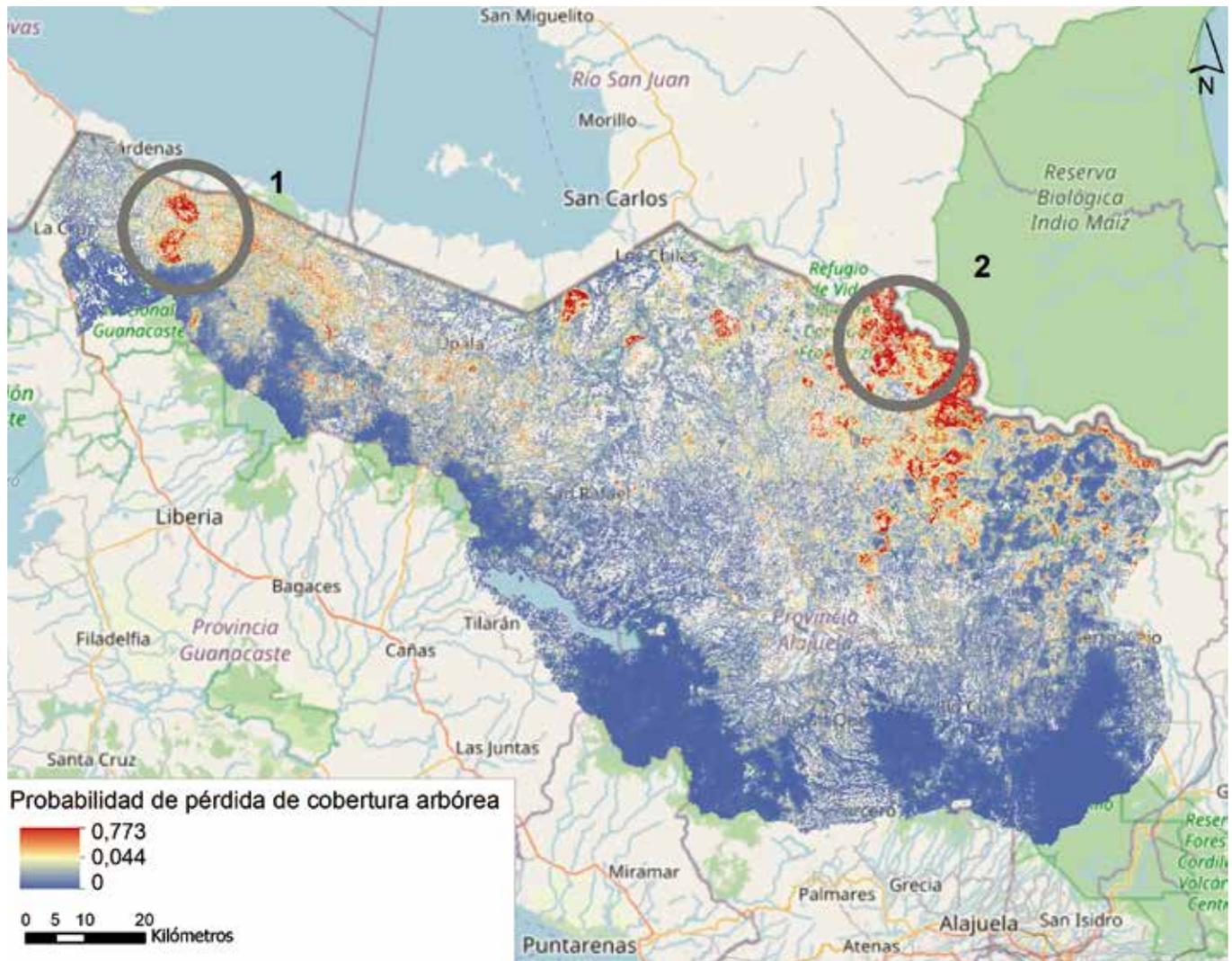
Río Frio y Zapote. Incluye centros poblacionales como Upala, Ciudad Quesada, Puerto Viejo de Sarapiquí y Los Chiles, y contiene importantes sitios de protección como los parques nacionales Juan Castro Blanco, Braulio Carrillo, volcán Arenal, volcán Tenorio, volcán Miravalles y Monteverde. Durante el año 2000, un 75% de su territorio poseía cobertura arbórea y, en el 2020, había perdido 689 km² de tal área (sin considerar ganancias); es decir, 8,4% de la que tenía a inicios de siglo; valor que supera el promedio nacional.

La predicción realizada para este capítulo estima una pérdida de cobertura arbórea de aproximadamente 155 km² entre 2021 y 2025; es decir, una disminución de un 2,1% respecto al 2020. Ese porcentaje es superior al promedio nacional y al reportado para las demás regiones

analizadas. No obstante, se espera que sea menor que el quinquenio previo y que se ubique por debajo de la media del período 2001-2020. Como se observa en el mapa 4.12, según la predicción, el borde sur de la región presenta un riesgo bajo de perder su cobertura arbórea. Allí se encuentran los parques nacionales Braulio Carrillo, Juan Castro Blanco y otros asociados a la Cordillera Volcánica de Guanacaste. También hay elevaciones y pendientes superiores a las llanuras del norte, lo cual dificulta las prácticas agrícolas. Las partes media y norte de la región están asociadas a un mayor riesgo de pérdida de cobertura arbórea.

El estudio destaca dos zonas: la zona 1 en el mapa se ubica cerca de los poblados de Santa Cecilia y Santa Elena, y muestra lugares de alto riesgo en las cercanías de la ruta nacional 4. Esta zona se caracteriza

Mapa 4.12

Zona Norte: probabilidad de perder la cobertura arbórea. 2021-2025

Fuente: Rodríguez, 2021, con datos de *OpenStreetMap*.

por cultivos de naranja, y por tener grandes extensiones dedicadas a la ganadería³. La zona 2 se ubica cerca de los poblados de Crucitas, Llano Verde, Jocote, Tiricias y San Isidro en los distritos de Pocosol y Cutris. Posee cultivos de piña, cítricos, frijol y caña de azúcar, ganadería extensiva y actividades de minería. Cerca de la frontera con Nicaragua y hacia el este, hay un alto riesgo de perder cobertura arbórea, porque en esa región se registraron afectaciones naturales que favorecieron la degradación boscosa, entre ellas el huracán Otto en 2016.

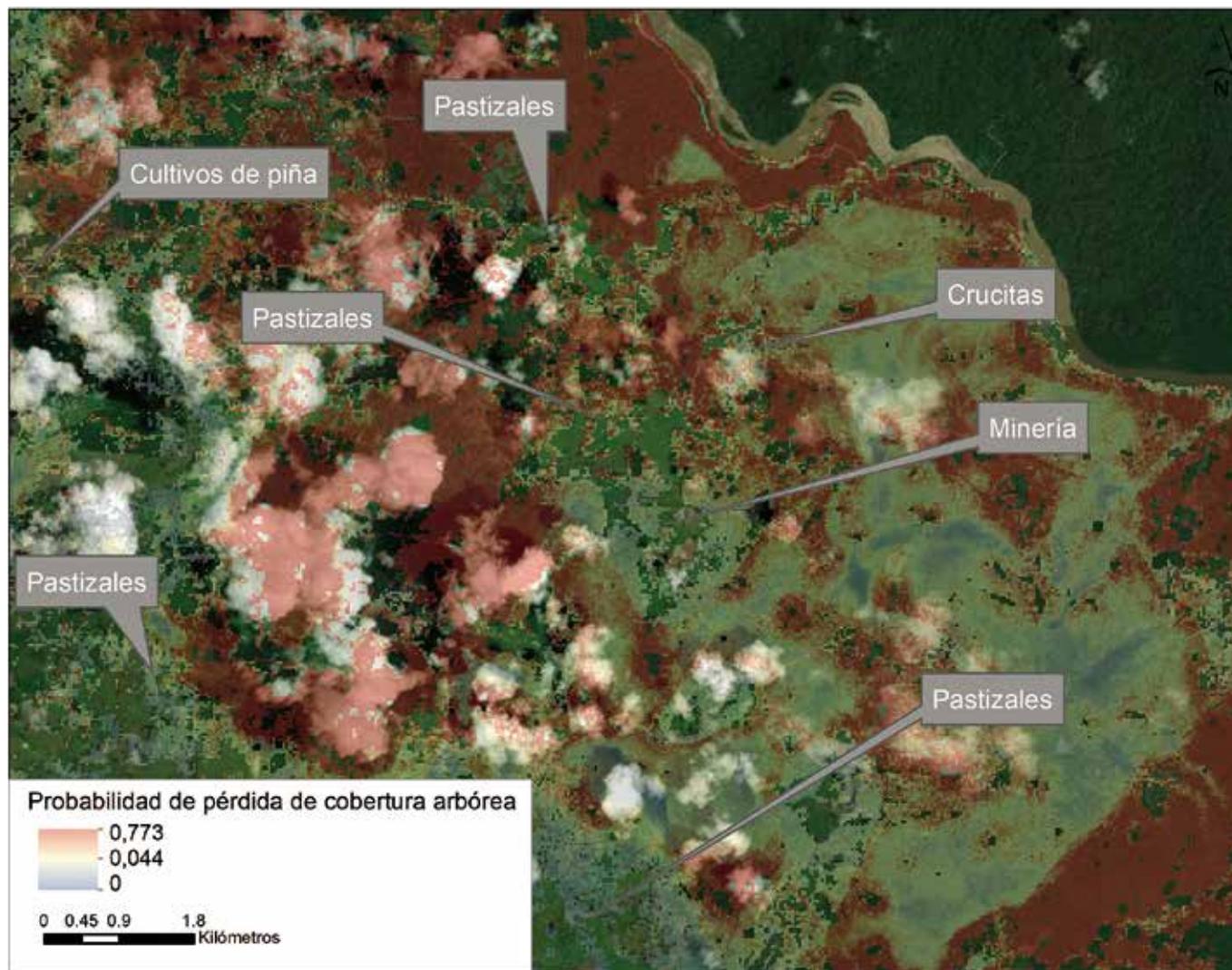
El análisis identificó “puntos calientes” por su alto riesgo de pérdida de cobertura arbórea (los casos de todas las regiones se pueden consultar en Rodríguez, 2021). En esta zona se trata de Llano Verde, Crucitas y Tiricias. Estos lugares poseen condiciones naturales y antropogénicas que la ponen en peligro. Como se observa en el mapa 4.13, hay una región rojiza en el centro, lo que obedece a la existencia de factores como la expansión piñera en el sector oeste, la degradación por eventos hidrometeorológicos, la minería en el sector este (Crucitas) y amplios terrenos

dedicados a la ganadería que ejercen presión sobre ella (Rodríguez, 2021).

Pacífico Central: presiones urbanas, agropecuarias y naturales sobre la cobertura arbórea

Esta zona tiene un área de 5.901 km² y comprende las cuencas Barranca, Jesús María, Tárcoles, Tusubres, Parrita, Damas y Naranjo. Incluye los principales núcleos urbanos de San José, Heredia y Alajuela. De 2001 a 2020 perdió 308,3 km² de cobertura arbórea -sin considerar

Mapa 4.13

Probabilidad de pérdida de cobertura arbórea. Detalle de Llano Verde, Crucitas y Tiricias 2021-2025

Fuente: Rodríguez, 2021.

ganancias-, lo que equivale a un 7,1% de lo que poseía en el año 2000; este porcentaje es superior al promedio nacional, aunque con tendencia a la baja.

De acuerdo con la predicción se espera una pérdida de cobertura arbórea cercana a los 48 km² al 2025, un 1,2% de la existente en la actualidad. Al clasificar espacialmente el área (mapa 4.14) destacan con bajas probabilidades (tonos azules) áreas con esquemas de protección: el parque nacional Carara, la zona protectora de Cerros Turubares, el parque nacional La Cangreja, la zona protectora de los Cerros de Escazú y el Refugio Nacional de Vida Silvestre

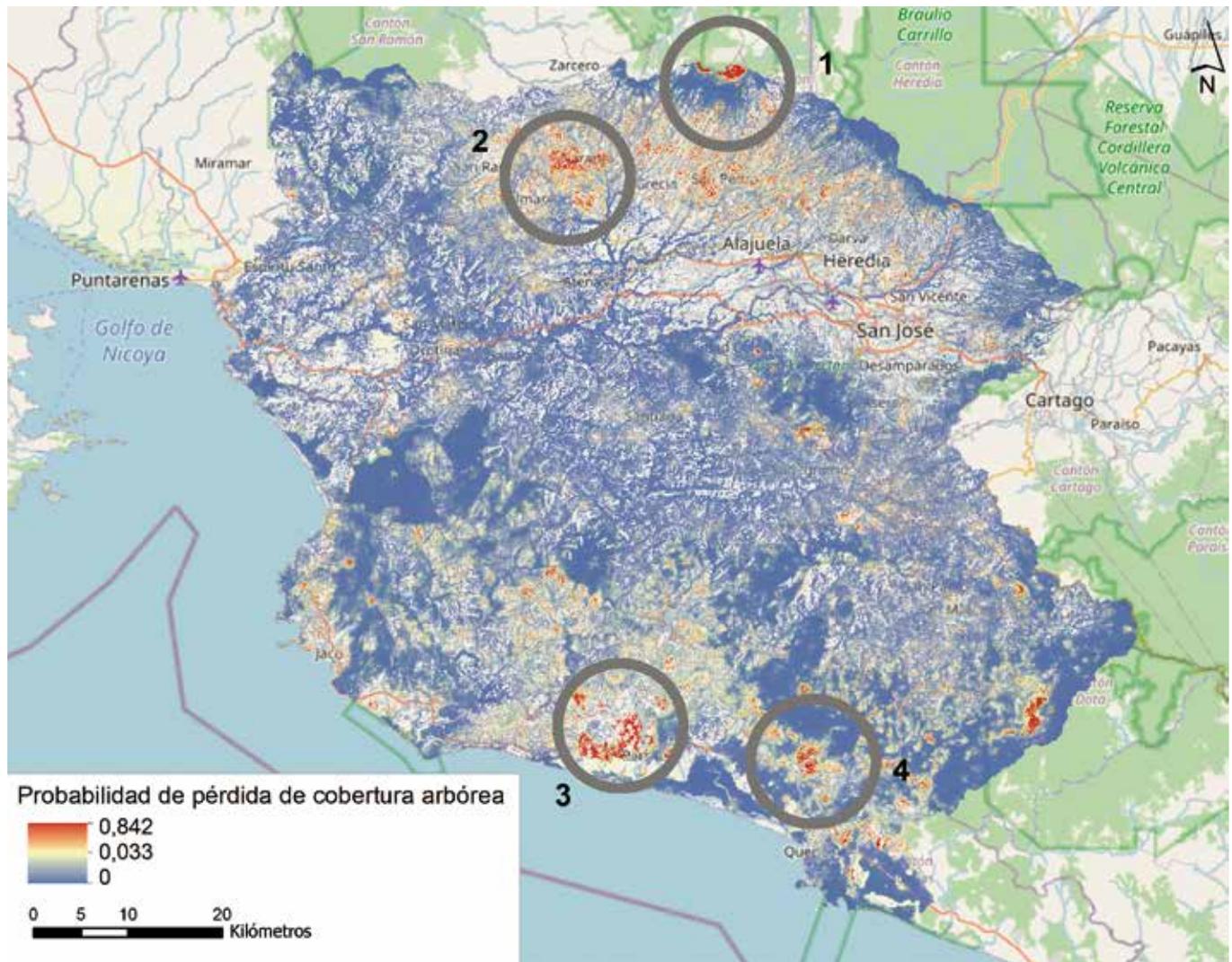
Cerro Redondo y sus alrededores. En el otro extremo (tonos rojos), se percibe un alto riesgo en el norte de las ciudades de Alajuela, Heredia, Naranjo y Grecia. También existe un conglomerado importante de alto riesgo en la zona costera, cerca de Parrita y San Rafael de Quepos.

El mapa anterior delimita cuatro zonas vulnerables. La zona 1 se ubica en un radio menor a 5 kilómetros del cráter del volcán Poás, dentro del parque nacional volcán Poás y la Reserva Forestal Grecia. El volcán ha presentado una actividad importante en los últimos cuatro años; fotografías satelitales del 2020 muestran procesos asociados a la pérdida natural

de cobertura arbórea. La zona 2 se ubica en las cercanías de la ciudad de Naranjo y es parte de la franja ubicada en las faldas de los volcanes Poás y Barva. Esta zona se caracteriza por su cercanía con algunos centros poblacionales (con presión por la mancha urbana), y por la presencia de diversos cultivos como el café. La cobertura arbórea está altamente fraccionada y, generalmente, se concentra en sitios cercanos a los cauces de los ríos. Al sur, la zona 3 se ubica en las cercanías de Parrita, donde existe una alta concentración de cultivos de palma y arroz; además de suelos dedicados a la ganadería, que ejercen presión sobre la

Mapa 4.14

Pacífico Central: probabilidad de pérdida de cobertura arbórea. 2021-2025



Fuente: Rodríguez, 2021 con datos de *OpenStreetMap*.

cobertura arbórea. Por último, la zona 4 se encuentra cerca del poblado de San Rafael de Quepos, situado a ambos márgenes del río Cañas. Al igual que la zona 3, en las cercanías hay cultivos de palma y terrenos dedicados al pastoreo.

Pacífico Sur: áreas protegidas permiten contener presión agropecuaria

La zona Pacífico Sur tiene un área de 10.213 km² y comprende las cuencas: Savegre, Barú, Térraba, Esquinas y península de Osa. Incluye centros poblacionales como San Isidro de El General y Buenos Aires, y alberga importantes sitios de protección como el parque nacional Corcovado, Piedras Blancas, sectores del Chirripó y parque internacional La Amistad. En el 2000 poseía cobertura arbórea en el 83,1% de su territorio; entre 2001 y 2020 perdió un 7,2%

(609 km²) -sin considerar ganancia-. Este porcentaje de pérdida es superior al promedio nacional (6,4%).

El ejercicio de predicción estima, entre 2021 y 2025, una pérdida de cobertura arbórea cercana a los 138 km², un 1,7% del porcentaje correspondiente al 2020. Esa proporción es mayor que el promedio nacional y solamente superado por la zona norte. Si se considera especialmente, la superficie con algún régimen de protección ambiental, como los parques nacionales La Amistad, Corcovado y Piedras Blancas tienen un riesgo comparativamente menor. Por el contrario,

PARA MÁS INFORMACIÓN SOBRE
**PREDICCIÓN DE PÉRDIDA
 DE COBERTURA ARBÓREA**
 véase Rodríguez, 2021,
 en www.estadonacion.or.cr

áreas con bajas elevaciones que inician en Quepos y continúan hasta Punta Burica muestran un elevado riesgo de perder cobertura arbórea. Adicionalmente existe una franja en riesgo en las elevaciones medias y bajas de los distritos de Biolley, Potrero Grande, Buenos Aires y Brunca.

Nuevamente, el estudio destaca y caracteriza cuatro zonas (mapa 4.15). La zona 1 se ubica en las cercanías de la Ciudad de Quepos, la 2 en Ciudad Cortés y la 3 comprende Ciudad Neilly y la mayor parte de Punta Burica. Es notorio que las zonas 2 y 3 están unidas por un área rojiza en sentido noroeste-sureste, que corresponde a la carretera Interamericana. Estas tres áreas

comparten características: bajas pendientes y elevaciones, acceso a rutas importantes y una gran presencia de cultivos de palma aceitera y arroz. Como “punto caliente” sobresale la zona 2; en ella destacan los cultivos de palma y arroz, y se ubica cerca del humedal Térraba-Sierpe que, aunque tiene probabilidades menores de perder su cobertura actual, presenta en sus bordes un mayor riesgo, probablemente producto de la presión que generan las prácticas agrícolas actuales (Rodríguez, 2021). Por último, la zona 4 se encuentra en una mayor elevación, cerca de los poblados de Colorado de Biolley y Campo Alegre de Potrero Grande. En sus cercanías hay cultivos

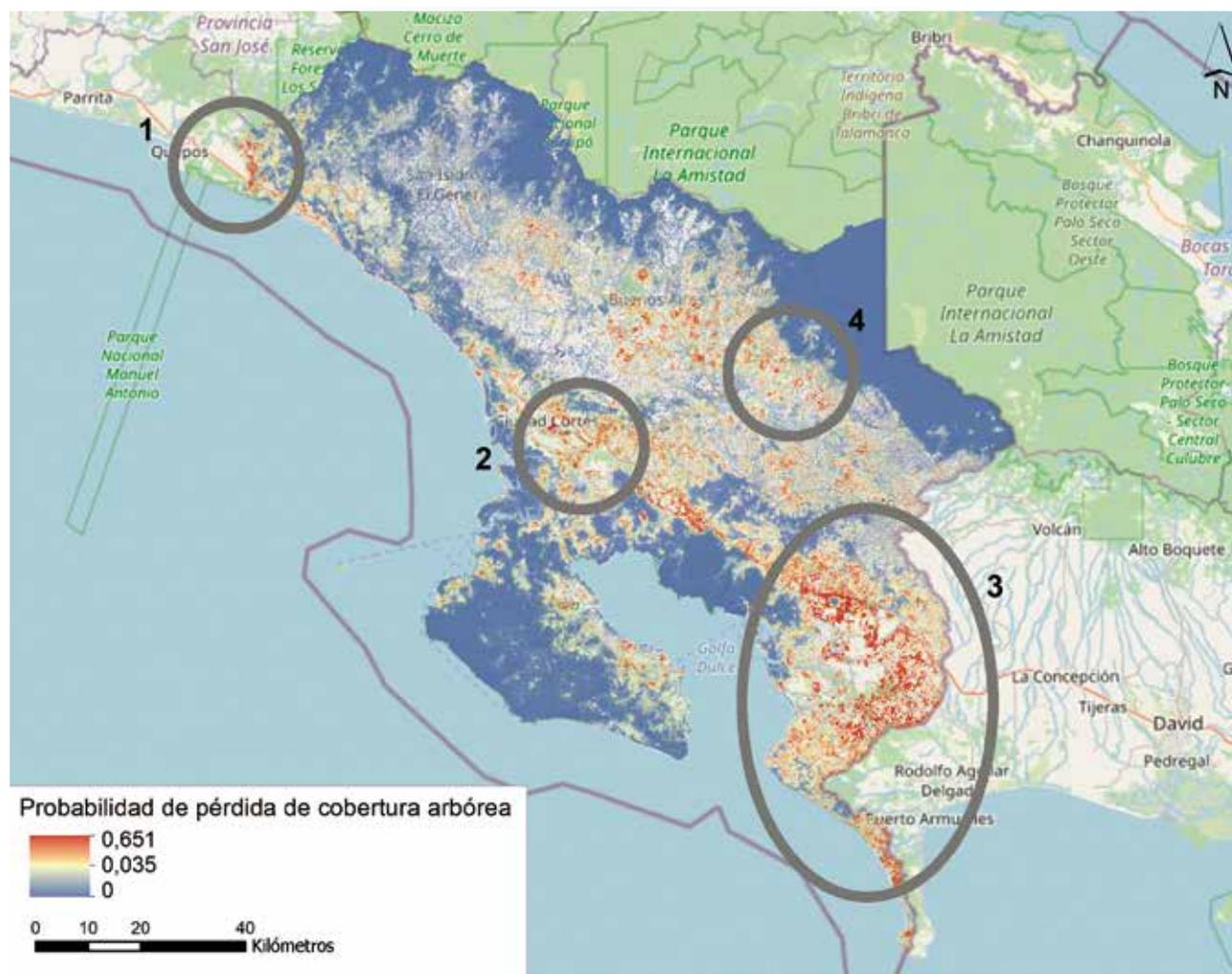
de palma, pero con menor densidad que en las otras zonas; también muestra una fuerte presencia de cultivos de piña y de terrenos dedicados a la ganadería.

Pacífico Norte: pérdida esperada es proporcionalmente menor que en las demás regiones

La zona Pacífico Norte tiene un área de 10.966 km² y comprende las cuencas de la península de Nicoya, Tempisque, Bebedero y Abangares. Incluye centros poblacionales como Liberia, Santa Cruz y Nicoya, así como ASP tales como los parques nacionales Rincón de la Vieja, Palo Verde, Diría y Santa Rosa. Poseía un 60,1% de su territorio con cobertura

Mapa 4.15

Pacífico Sur: probabilidad de pérdida de cobertura arbórea. 2021-2025



Fuente: Rodríguez, 2021 con datos de *OpenStreetMap*.

arbórea en el año 2000, y perdió, en veinte años, 341 km² de tal área -sin considerar ganancias-, lo que equivale a un 5,2% de la cobertura del año 2000, valor inferior al promedio nacional.

Las predicciones para esta zona indican una pérdida esperada cercana a los 32 km² de cobertura arbórea entre 2021 y 2025, lo que constituye el menor porcentaje de todas las regiones analizadas (un 0,5% respecto a la situación del 2020), inferior al promedio nacional. No obstante, como se indicó al inicio de esta sección, es la única región donde la predicción aumentaría respecto a la pérdida del quinquenio anterior. Como se observa en el mapa 4.16, destacan áreas con bajas

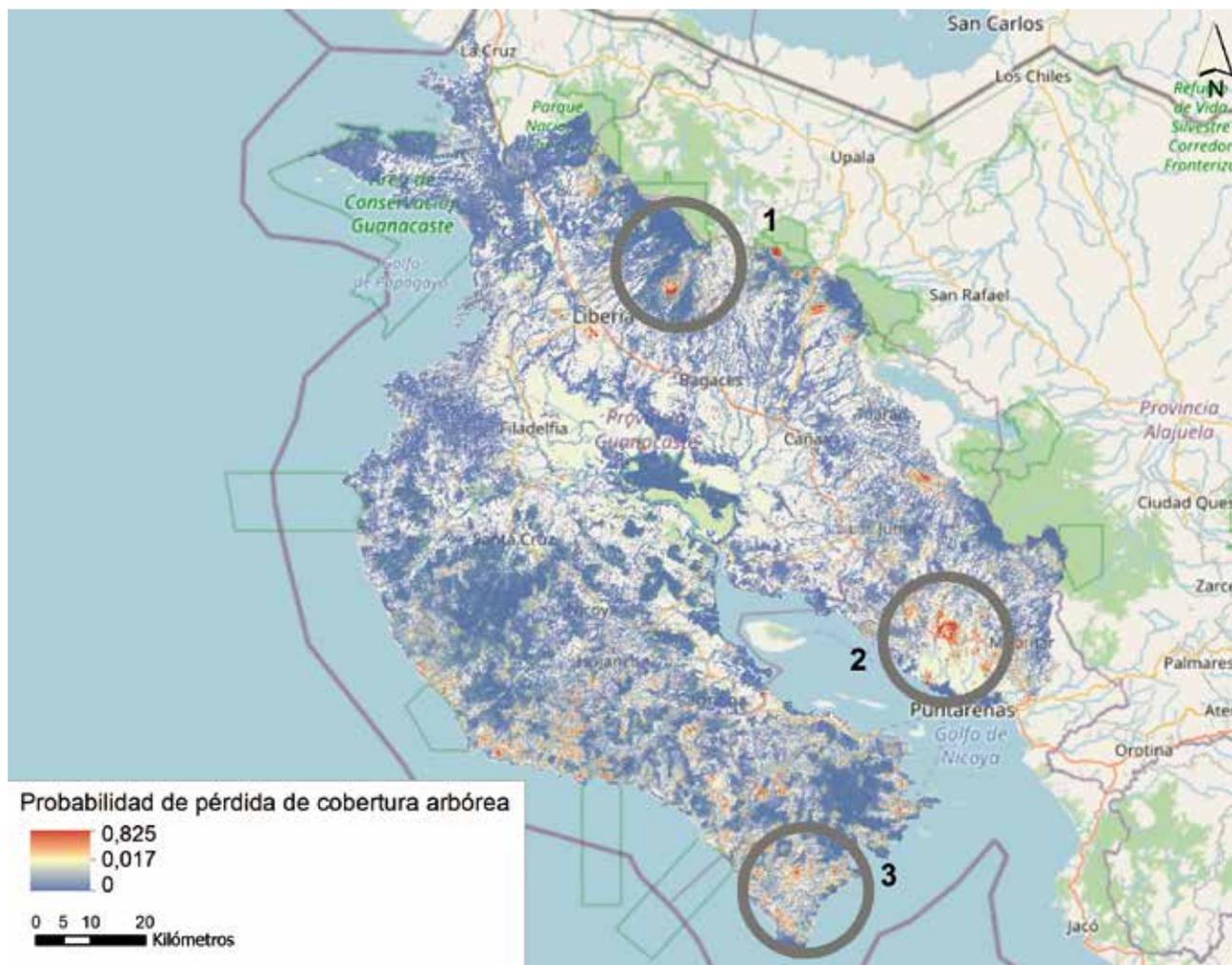
probabilidades de pérdida, entre ellas los parques nacionales Santa Rosa, Rincón de la Vieja, Palo Verde, la zona protectora de la península de Nicoya y la reserva biológica Lomas del Barbudal. En general, las áreas con mayor riesgo están dispersas.

En esta región se identifican tres zonas relevantes; la zona 1 se encuentra en el oeste del distrito de Mogote de Bagaces, unos once kilómetros al suroeste de Guayabo. Posee una amplia cobertura forestal cerca del parque nacional Rincón de la Vieja; sin embargo, en ella se aprecia ganadería extensiva y terrenos con suelo desnudo que ejercen presión sobre los bosques. La zona 2 se ubica a menos de

diez kilómetros del poblado de Sardinal de Puntarenas en dirección suroeste, y se caracteriza por contar con cultivos de caña y piña, así como con terrenos dedicados al pastoreo. Por último, la zona 3 se ubica en la península de Nicoya e incluye los poblados de Cóbano, El Carmen, Tacotales y Betel. Allí es común encontrar plantaciones de arroz y teca, así como vastas áreas dedicadas a la ganadería. Por su atractivo turístico, se encuentran desarrollos urbanísticos en las cercanías del litoral a lo largo de la zona (Rodríguez, 2021). En el poblado de Cóbano en particular, existe un área boscosa rodeada de usos agropecuarios y el GFC identificó pérdida arbórea reciente (entre 2018 y

Mapa 4.16

Pacífico Norte: probabilidad de pérdida de cobertura arbórea. 2021-2025



Fuente: Rodríguez, 2021 con datos de *OpenStreetMap*.

2020). Esas localidades se encuentran cerca de un camino de bajo tránsito y tienen patrones geométricos que podrían asociarse a causas antropogénicas como la tala selectiva (Rodríguez, 2021).

Zona Caribe con importantes presiones recientes en su cobertura

La zona Caribe tiene un área de 13.003 km² y comprende las cuencas: Sixaola, Estrella, Banano, Bananito, Moín, Matina, Madre de Dios, Pacuare, Reventazón, Tortuguero y Chirripó. Incluye centros poblacionales como Limón, Guácimo, Guápiles y Matina, y

zonas protegidas como Tortuguero, La Amistad, Tapantí-Macizo de la Muerte y Braulio Carrillo. Los datos del GFC registran que, en el 2000, poseía un 88,4% del territorio con cobertura arbórea, y que perdió 582 kilómetros cuadrados -sin considerar ganancias- entre 2001 y 2020, un 5,1%; este porcentaje es inferior al promedio nacional y a todas las unidades hidrológicas analizadas en esta investigación; no obstante, es la que presenta mayor incremento relativo reciente.

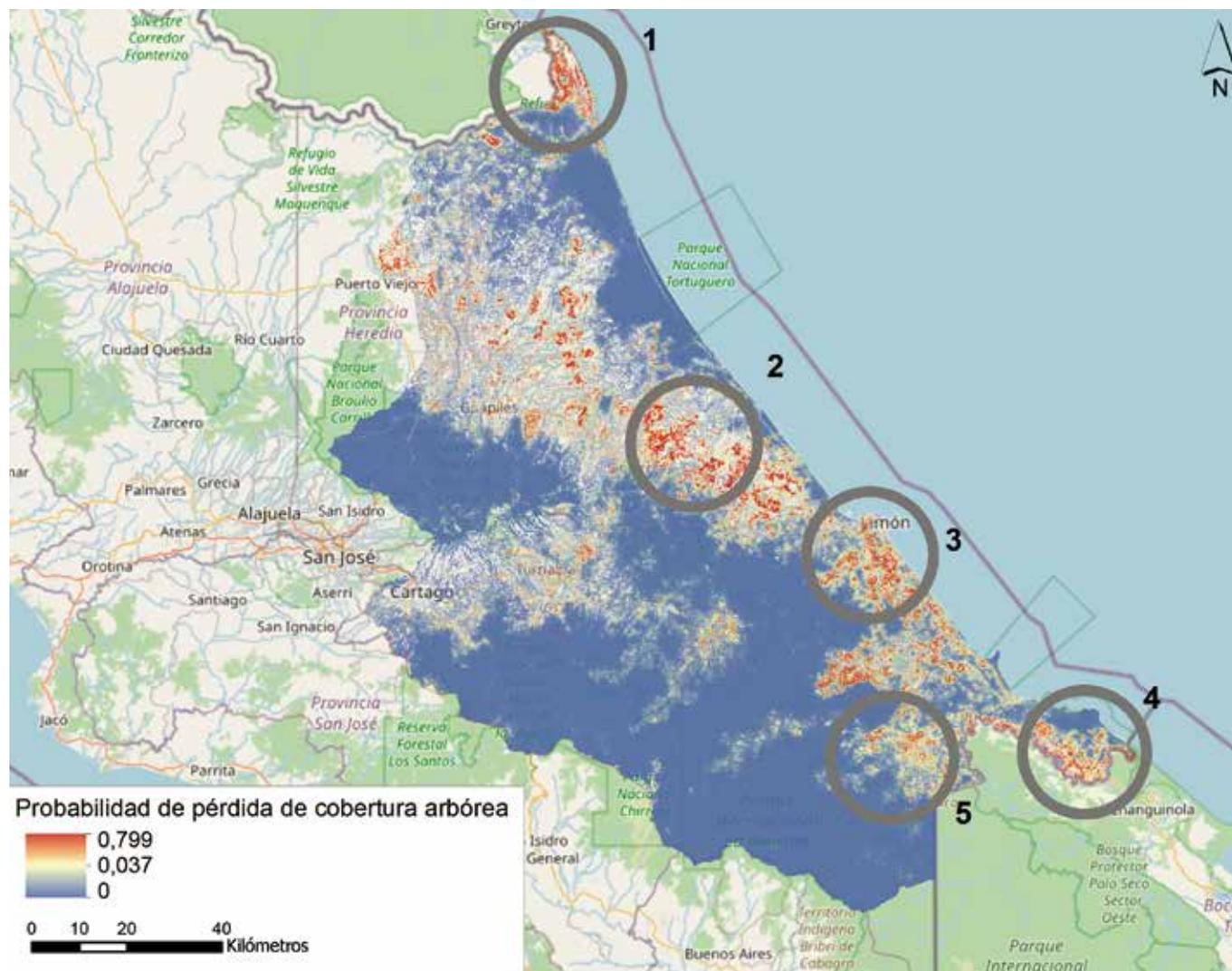
La predicción señala que la zona Caribe podría sufrir una pérdida de cobertura arbórea cercana a los 141 kilómetros cuadrados; es decir, un 1,3% de la actual.

Esta cifra es inferior al promedio nacional (1,4%). El escenario es favorable respecto al quinquenio anterior; sin embargo, la tendencia sigue siendo al alza de acuerdo con todos los periodos estudiados.

La región Caribe muestra sectores claramente definidos que tienen bajo riesgo de perder su cobertura arbórea en el periodo analizado. Estos corresponden, en gran parte, a zonas protegidas, como el parque internacional La Amistad, los parques nacionales Braulio Carrillo, Chirripó, Tapantí-Macizo de la Muerte y Tortuguero. En este caso se identificaron cinco diferentes zonas de riesgo (mapa 4.17). En el extremo norte, la zona

Mapa 4.17

Zona Caribe: probabilidad de pérdida de cobertura arbórea. 2021-2025



Fuente: Rodríguez, 2021 con datos de *OpenStreetMap*.

1 se concentra en la isla Calero que, de acuerdo con los datos provenientes del GFC ha sufrido una pérdida de cobertura arbórea en alrededor de 32 km² desde el 2005. La inspección de fotografías satelitales⁴ muestra terrenos dedicados a la ganadería y a la tala de árboles en vastas extensiones aledañas al río San Juan, así como pérdidas relacionadas con eventos naturales. La zona 2 se localiza en las cercanías de Matina, Batán y Venecia, y revela una alta densidad de plantaciones bananeras (Rodríguez, 2021).

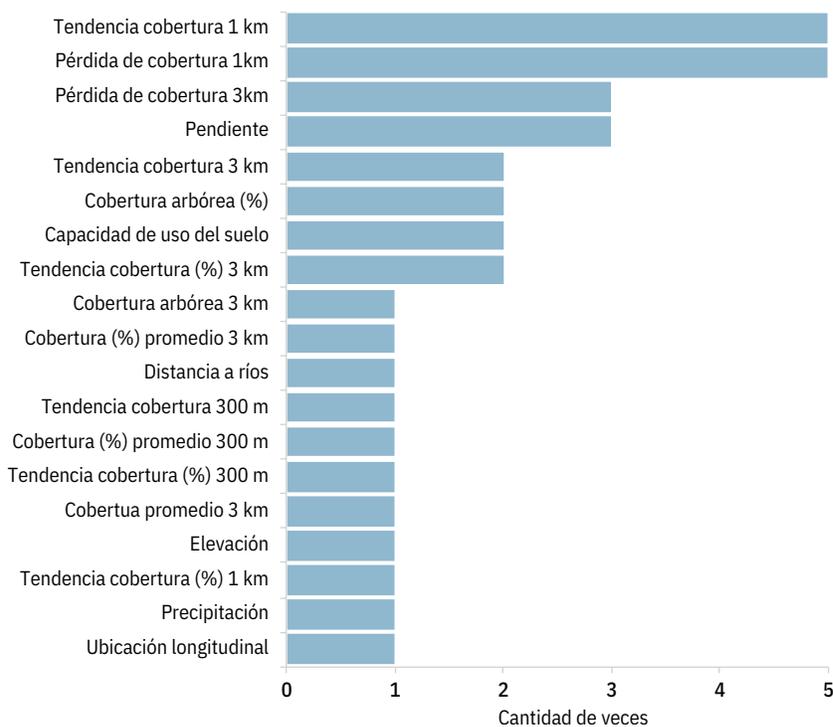
La zona 3 es un área delimitada por la línea del ferrocarril y la Ruta 36. En ella se ubican los poblados de La Bomba, Beverly, Bananito Sur, San Andrés, San Clemente y Bonificio. Se caracteriza por ubicarse a menos de 5 kilómetros del litoral, ser accesible por medios terrestres, y poseer un cultivo intensivo de banano. En las cercanías de la ciudad de Sixaola se localiza la zona 4, que presenta una agricultura extensiva de banano y plátano que bordea el margen izquierdo del río Sixaola. Por último, la zona 5 se localiza en la cuenca baja del río Telire cerca de las comunidades de Shiroles y Amubri; tiene pendientes inferiores al 5% y alturas menores a los 250 msnm. Los terrenos están dedicados principalmente a la agricultura y la ganadería, y posee un fraccionamiento mayor del correspondiente a las zonas 2, 3 y 4; todas ellas coinciden en tener bajas elevaciones y bajas pendientes. En las zonas 2, 3, 4 y 5 la capacidad de uso de la tierra favorece el desarrollo agropecuario, lo que coincide con su aprovechamiento actual y ejerce presión sobre la cobertura arbórea.

Historial de cambios de uso explica la mayoría del riesgo de pérdida de cobertura arbórea

La predicción de la pérdida de cobertura arbórea presentada en las secciones previas permite ubicar territorialmente zonas en donde es importante revisar la situación para orientar la toma de decisiones. Pero, además de cuantificar y localizar ese riesgo, también es relevante identificar el aporte relativo de algunas variables que conformaron el modelo predictivo. Ese ejercicio permite validar el funcionamiento del modelo y ofrece

Gráfico 4.14

Cantidad de apariciones de cada variable^{a/} entre las de mayor contribución para las cinco regiones analizadas



a/Se consideran las variables que aparecen entre las siete que tienen mayor valor en la predicción. Fuente: Rodríguez, 2021.

información clara para entender los factores que impactan la predicción de manera considerable. A grandes rasgos, los registros pasados de pérdida arbórea en el entorno inmediato de cada lugar analizado, y la tendencia que indican en el corto plazo, constituyen las variables más importantes para explicar el riesgo futuro.

Las variables consideradas en el estudio son 41. Se aplicó la metodología “Valores Shapley” para cuantificar la contribución relativa en la predicción (para ver el detalle consulte el Anexo Metodológico al final del capítulo). Sin embargo, de estas variables son las de mayor recurrencia por el valor que muestran en las cinco regiones analizadas. Entre ellas sobresalen dos (gráfico 4.14). Primero, *la pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a una distancia de un kilómetro* alrededor de cada lugar estudiado. En general, cuanto mayor es la pérdida registrada en el entorno inmediato, mayor

es la contribución de ese hecho sobre el riesgo de perder la cobertura en el futuro. En segundo término, está *la tendencia de pérdida del porcentaje de cobertura arbórea promedio en los últimos cinco años, a una distancia cercana al kilómetro* alrededor de cada sitio estudiado (de 30 por 30 metros). En este caso, cuanto más negativa sea la tendencia registrada en el entorno, mayor será la contribución a la pérdida de cobertura en el futuro, y viceversa.

En un segundo nivel, otras dos variables aparecieron entre las de mayor importancia para explicar la predicción de pérdida de cobertura en tres regiones: *el grado de pendiente* del terreno y *la pérdida de cobertura arbórea durante los últimos cinco años, en sitios que se localizan a tres kilómetros* alrededor de los lugares estudiados.

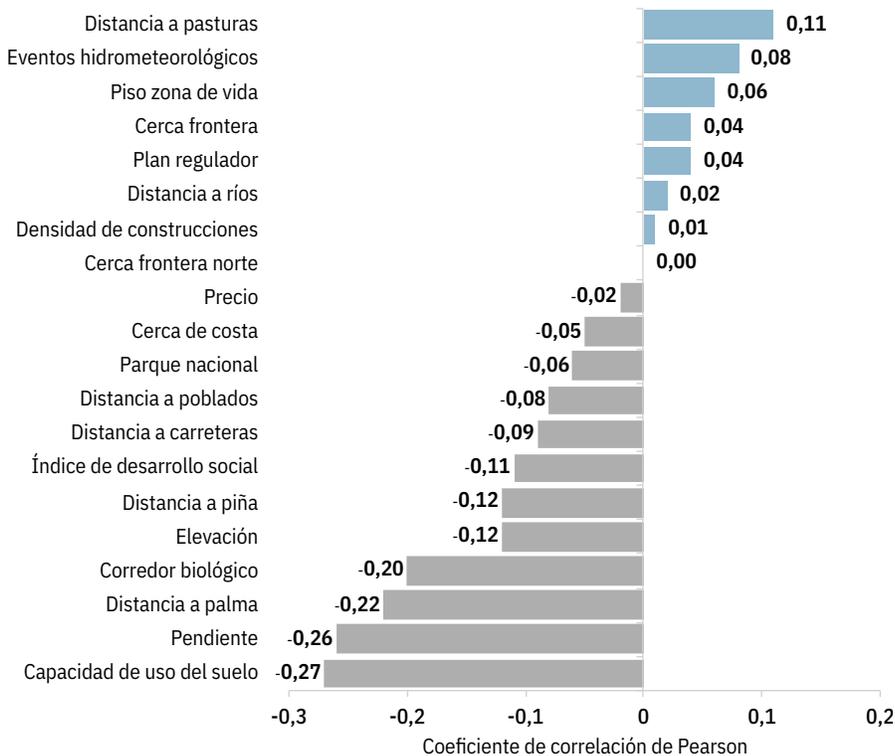
Posteriormente, en dos regiones surgen cuatro variables entre las más significativas en el modelo. Una de ellas es la

tendencia a la pérdida del porcentaje de cobertura arbórea promedio en los últimos cinco años, a una distancia de tres kilómetros alrededor de cada sitio objeto de estudio. En segundo lugar, la capacidad de uso del suelo indica que, en general, una vocación agrícola alta contribuye a la probabilidad de perder cobertura arbórea en el futuro, y viceversa. Además, el porcentaje de cobertura arbórea registrado en el año 2000 indica que, frecuentemente, las áreas con menor cobertura afectan negativamente la pérdida de cobertura arbórea. Finalmente, también resultó significativo el peso de la tendencia de la cantidad de área con cobertura arbórea en los últimos cinco años, a tres kilómetros alrededor de cada lugar estudiado, como factor que define el grado de riesgo de pérdida de esa cobertura.

En suma, las variables que aportan mayor valor a la predicción se relacionan con el historial de pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años. En general, lideran las estadísticas calculadas a tres kilómetros de distancia del sitio analizado, con excepción de las zonas Pacífico Norte y Pacífico Central, donde los efectos son más relevantes en un trayecto de un kilómetro. En el Pacífico Central, Pacífico Norte y el Caribe es importante destacar la pérdida observada, la cantidad (áreas con cobertura arbórea en las cercanías) y calidad (porcentaje de cobertura arbórea de las áreas que la presentan en las cercanías) de áreas con cobertura arbórea cercanas al área analizada. Factores topográficos, como la pendiente y la elevación, sobresalen entre las variables que más contribuyen a conservar la cobertura arbórea en el Pacífico Central, Pacífico Sur y Caribe. En general, una mayor pendiente y elevación propician la conservación del dosel arbóreo. En el Pacífico Sur y Norte, la capacidad de uso del suelo es relevante y contribuye a la conservación de la cobertura en las áreas que presentan limitaciones para el desarrollo de las prácticas agropecuarias. Finalmente, tres variables aisladas están presentes entre las siete que colaboran en mayor grado: distancia de los ríos, ubicación longitudinal y precipitación anual. Si se analiza este proceso por regiones, se perciben diferencias entre

Gráfico 4.15

Coefficiente de correlación entre la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea y variables seleccionadas



Fuente: Rodríguez, 2021.

ellas (ver Rodríguez, 2021); no obstante, persiste la participación de estas ocho variables principales.

Menor desarrollo social, ausencia de esquemas de resguardo y presiones agropecuarias caracterizan las zonas más propensas a perder la cobertura arbórea

El último ejercicio de esta investigación analizó las características comunes de los territorios con mayor probabilidad de perder su cobertura arbórea en el futuro cercano. Con ese propósito se empleó un enfoque bivariado y, a partir de las predicciones obtenidas, se graficó la distribución de algunas variables que fueron utilizadas en el modelo, junto a otras que no se incluyeron antes por limitaciones temporales en la información. Con un coeficiente de correlación (gráfico 4.15), es posible calcular la asociación lineal

entre la probabilidad de perder cobertura arbórea en un lugar concreto, contra alguna variable específica. Las barras grises indican una asociación positiva con la pérdida de cobertura arbórea; es decir, cuando existe un aumento en la variable se espera que la probabilidad de perder su cobertura arbórea también aumente. En el caso de las barras celestes tal relación es inversa y, por tanto, un aumento en la variable implica una disminución en la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.

Con base en este ejercicio y en un análisis no lineal (Rodríguez, 2021) se extraen dos grandes conclusiones generales, y otras con mayor nivel de especificidad. En el primer caso, se puede afirmar que los puntos que soportan una mayor presión para perder su cobertura arbórea en el 2025 se caracterizan por ser aptos para desarrollar actividades agropecuarias. Entre las variables que más

influencia muestran están la capacidad de uso, pendientes bajas y presencia de otros cultivos como la piña, la palma y el pasto (Rodríguez, 2021). Este hallazgo concuerda con lo identificado en las primeras secciones del capítulo y autores como Sierra et al (2016), que señalan que los factores directos que más intervienen en el cambio de cobertura forestal en Costa Rica son el pastoreo y la agricultura. Además, en las zonas que presentan mayor riesgo los precios de la tierra son inferiores, son más accesibles por vías terrestres, se ubican cerca de centros urbanos y poseen un índice de desarrollo distrital⁵ más bajo que otros territorios.

En cambio, las zonas que se encuentran bajo esquemas de protección, corredores biológicos, en las franjas de protección de ríos y en zonas costeras se asocian a una mayor probabilidad de conservar la cobertura arbórea actual. Esa caracterización demuestra una asociación positiva para la conservación, en concordancia con estudios pasados (Robalino y Villalobos, 2014; Morera, Sandoval y Alfaro, 2021). En términos topográficos, los terrenos menos propensos a perder cobertura arbórea se ubican en pisos altitudinales más altos de las zonas de vida, y con altas pendientes y elevaciones.

En síntesis, se asocian con un mayor riesgo de **perder** su cobertura arbórea en el 2025 las siguientes características:

- Tierras con capacidad de uso favorable al desarrollo agropecuario.
- Terrenos con precio más bajo.
- Áreas ubicadas a una distancia menor de 500 metros de una frontera internacional.
- Lugares con más cercanía a carreteras y poblados.
- Sitios cercanos a cultivos seleccionados para el análisis, como piña y palma.
- Áreas ubicadas a menos de 2,5 kilómetros de pasturas.
- Zonas más alejadas de los cauces de ríos.

- Pisos altitudinales ubicados en las partes bajas del paisaje.
- Cantones con bajas densidades de construcción.
- Cantones que registran mayor cantidad de eventos hidrometeorológicos.

Los siguientes atributos se asocian con una mayor probabilidad de **conservar** su cobertura arbórea en el 2025:

- Áreas dentro de un parque nacional o un corredor biológico.
- Tierras con capacidad de uso que no son favorables para el desarrollo agropecuario.
- Lugares más alejados de una frontera agrícola y de cultivos analizados (piña y palma).
- Terrenos con pendientes y elevaciones mayores, y pisos altos de las zonas de vida.
- Distritos con un mayor índice de desarrollo social.
- Áreas cercanas a la costa.

Conclusiones

En las últimas tres décadas, Costa Rica ha tenido su mayor fortaleza ambiental en la agenda de conservación. Ha consolidado y aumentado sus áreas protegidas, creado esquemas de resguardo -públicos y privados- y aplicado instrumentos normativos y económicos que favorecen el cuidado y recuperación de su cobertura forestal. Estos logros son únicos en el marco regional centroamericano y requieren de atención, tanto para identificar los factores que los han posibilitado como, ante todo, para actuar con medidas que contengan las presiones que podrían vulnerar ese resultado en el futuro cercano.

El análisis realizado en este capítulo no corresponde a una lectura integrada de la gestión ambiental, marcada de manera significativa por debilidades en otras

agendas -urbana, energética, hídrica, de transporte, de residuos sólidos e, incluso, de las capacidades para manejar esta conservación-. Constituye una visión detallada sobre el campo forestal reciente, con aportes concretos que enriquecen la discusión, permiten entender sus características y apoyan la toma de decisiones para contener los riesgos que se enfrentan en esta materia.

Este capítulo presentó estudios novedosos que incluyen tres aportes. En primer lugar, una lectura de los grandes tipos de uso del suelo existentes entre 1986 y 2019 demuestra que la recuperación de cobertura forestal derivó principalmente de la sustitución de pastos y cultivos en el período 1996-2006, usos que habían “robado” previamente tierra al bosque en los años ochenta e inicios de los noventa. El nivel más alto de recuperación forestal aconteció en el lapso 2006-2014 y se registró principalmente en Guanacaste, la zona norte, el Caribe y el Pacífico Sur. Sin embargo, durante la etapa que transcurre del 2014 al 2019, aumentó nuevamente la tasa de cambio de uso de cobertura forestal a pastos, cultivos y uso urbano, evidenciando nuevas presiones.

En segundo lugar, uno de los elementos que dan relevancia a la cobertura forestal es su potencial como depósitos de carbono para la mitigación del cambio climático. Una investigación sobre patrones temporales y espaciales encontró que el *stock* de carbono presenta una relativa estabilidad, pero como resultado de una serie de pérdidas y ganancias que se ha conformado a través del tiempo, y que se han distribuido de manera desigual en el territorio. Es decir, hay áreas que evidencian un deterioro de sus existencias forestales de carbono. Además, pese a una recuperación importante, aún no se alcanzan los niveles de depósitos forestales de carbono existentes a finales de la década de los ochenta. Además, el balance positivo está basado en la reducción de emisiones producto de la deforestación y en la estabilidad de las remociones; es decir, no se ha incrementado la capacidad de absorción. Eso significa que, según sea el nivel de futuras emisiones en el país, las remociones no alcanzarán para lograr

compensarlas y arriesgarán el resultado positivo. Esto considerando, sobre todo, que el estudio solo toma en cuenta las emisiones por deforestación, pero Costa Rica debe absorber lo que emiten otros sectores con mucha intensidad, especialmente en el campo energético.

Los hallazgos muestran que las áreas protegidas tienen una representación mayor entre los depósitos de carbono del país, que en su participación como porcentaje del territorio nacional. Pero, la mayoría de los depósitos están fuera de las áreas protegidas, y allí se explica una gran parte de la recuperación reciente. Lo anterior representa un riesgo para garantizar la sostenibilidad del *stock* ante nuevas presiones productivas sobre las tierras forestales.

Por las vulnerabilidades mencionadas, es imperativo evitar que el país caiga en nuevos procesos de deforestación, para garantizar los múltiples aportes de la cobertura forestal. A partir de metodologías de aprendizaje automático, una

herramienta de predicción de la pérdida de cobertura arbórea en el futuro cercano (2021-2025) indica que se podría perder parte del dosel actual, y ubica espacialmente ese riesgo. Esto constituye un insumo que posibilita la definición de políticas territoriales específicas enfocadas en la conservación.

Las zonas que recibirán una mayor presión sobre su cobertura arbórea en los próximos cinco años se caracterizan por tener aptitud para desarrollar otras actividades: la capacidad de uso agropecuario, pendientes bajas y presencia cercana de otros cultivos como la piña, la palma y el pasto. Estas áreas también se encuentran en regiones donde los terrenos tienen precios más bajos, son más accesibles por vías terrestres y el índice de desarrollo tiende a ser más bajo que el de los otros distritos. Por el contrario, las superficies que se ubican dentro de las áreas protegidas, los corredores biológicos o en las márgenes de ríos y zonas costeras están asociadas a una mayor

probabilidad de conservar su cobertura actual.

Las herramientas aquí presentadas permiten identificar presiones concretas, ubicarlas en el espacio y aportar fundamentos al debate y a la toma de decisiones para impulsar el mantenimiento y la sostenibilidad de los logros alcanzados en cobertura forestal. Además, enfocan con claridad territorios específicos que, por sus características, viven presiones recientes y riesgos inmediatos, que vulneran los avances obtenidos en cuanto a la protección o recuperación de bosques. Además, posibilitan la comprensión del papel que desempeñan estos terrenos en aspectos medulares, tales como la mitigación y adaptación al cambio climático. Evidencian, además, la necesidad de integrar más la agenda de conservación con la de otros sectores, y no debilitar (sino, más bien, fortalecer) las capacidades institucionales y financieras para contener el peso de esas presiones.

Investigadores principales:

Amram Aragón Ramírez, Esteban Durán Monge, Vladimir González Gamboa, Rudy Muñoz Jiménez, Darío Rodríguez García y Cristian Vargas Bolaños.

Insumos:

Descripción de cambios de uso del suelo en Costa Rica: 1986-2019, de Vladimir González Gamboa, Rudy Muñoz Jiménez, Cristian Vargas Bolaños y Esteban Durán Monge; *Patrones espaciales y temporales de los depósitos forestales de carbono, emisiones y remociones por cambios en la cobertura forestal en Costa Rica durante el período 1986-2019*, de Esteban Durán Monge y Amram Aragón Ramírez y *Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica*, de Darío Rodríguez García.

Borrador del capítulo:

Leonardo Merino Trejos y Karen Chacón Araya.

Coordinación:

Leonardo Merino Trejos y Karen Chacón Araya.

Edición técnica:

Leonardo Merino Trejos y Karen Chacón Araya, con el apoyo de Jorge Vargas-Cullell.

Asistente de investigación:

Sebastián González Rosales.

Actualización y procesamientos de datos:

Amram Aragón Ramírez, Esteban Durán Monge, Vladimir González Gamboa, Rudy Muñoz Jiménez, Darío Rodríguez García, y Cristian Vargas Bolaños.

Visualización de datos:

Amram Aragón Ramírez, Esteban Durán Monge, Vladimir González Gamboa, Rudy Muñoz Jiménez, Darío Rodríguez García, y Cristian Vargas Bolaños.

Lecturas críticas:

German Obando Vargas (REDD+), quien fungió como lector crítico en el taller de consulta del borrador, así como Darío Rodríguez García (consultor independiente), Esteban Durán Monge, Vladimir González Gamboa, Marisol Guzmán Benavides, Alberto Mora Román y Jorge Vargas-Cullell (PEN).

Revisión y corrección de cifras:

Karen Chacón Araya y Sebastián González Rosales.

Corrección de estilo y edición de textos:

Hazel Vargas Zeledón.

Diseño y diagramación:

Erick Valdelomar/Insignia | ng

Un agradecimiento especial a German Obando (REDD+) y a Roberto Rodríguez (IMN) por su asesoría, acompañamiento, lectura y revisión de los insumos preparados para este capítulo, así como a la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (Fundecor) por su apoyo para el desarrollo del estudio sobre pérdida de cobertura arbórea. Se agradece también a Guisella Quirós y Héctor Arce (Fonafifo), Federico Alice y William Fonseca (UNA); Jorge García; Ana Rita Chacón (IMN); Walter Zavala (Minae) y a Manuel Murillo (consultor independiente, quien colaboró con la interpretación de imágenes satelitales).

Los talleres de consulta se realizaron el 1 y el 15 de junio, y el 30 de agosto de 2021, con la participación de Marielos Alfaro, Amram Aragón, Rosario Alfaro, Héctor Arce, Oliver Bach, Maureen Ballester, Margarita Bolaños, Allan Borges, Eva Carazo, Ana Rita Chacón, Mauricio Chacón, Eddy Delgado, Helio Fallas, María Luisa Fournier, Andrea San Gil, Gustavo Hernández, Renato Jiménez, Pedro Ernesto León, Alonso López, Kenneth López, German Masís, Cornelia Miller, Ana Lucía Moya, Rudy Muñoz, Gilmar Navarrete, German Obando, Guisella Quirós, Ciska Raventós, Carolina Reyes, Darío Rodríguez, Frank Salas, José Sequeira, Arturo Steinworth, Arturo Ureña, Cristian Vargas y Daniel Villavicencio.

Notas

1 En el contexto de la teledetección, un mosaico se refiere a la combinación o fusión de dos o más imágenes satelitales de zonas y momentos específicos. Su proceso de conformación incluye la aplicación de ciertos criterios de calidad, lo que hace que dicha combinación sea de alta calidad. Este tipo de imágenes se disponen de tal forma que crean una imagen de Costa Rica para todo un año y para todo el territorio (González *et al.*, 2021).

2 En el contexto de la teledetección, la firma espectral de la superficie se refiere a la radiación reflejada en función de la longitud de onda. Cada uso de suelo presenta una firma espectral identificable y extrapolable (Pedraza, 2001).

3 A partir de este mapa, la interpretación de imágenes satelitales contó con la ayuda del ingeniero agrónomo Manuel Murillo Arroyo (Rodríguez, 2021).

4 *US Department of State Geographer Image, Airbus Image y Maxar Technologies*, recuperado de *Google Earth*, 2021.

5 Con base en el índice de desarrollo social del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica en el nivel distrital y correspondiente el año 2017, último disponible.

