



**ESTADO  
DE LA NACIÓN**

---

**Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2021**

---

**Investigación de base**

---

Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica  
2021-2025 : versión ampliada caso de estudio de la zona de Sarapiquí

Investigador:  
Darío Rodríguez García

San José | 2022



333.75  
R696p

Rodríguez García, Darío.

Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica 2021-2025 : versión ampliada caso de estudio de la zona de Sarapiquí / Darío Rodríguez García. -- San José. -  
- Datos electrónicos (1 archivo : 6500 kb). -- San José, C.R. : CONARE - PEN, 2022.

ISBN 978-9930-607-94-7

Formato PDF, 93 páginas.

Investigación de Base para el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2021 (no. 27)

1. COBETURA FORESTAL. 2. LEGISLACIÓN. 3. SARAPIQUÍ, HEREDIA, COSTA RICA. I. Título.



## Índice

|  |           |
|--|-----------|
| Introducción .....   | 4         |
| Objetivo.....  | 4         |
| Pregunta general.....  | 5         |
| Preguntas específicas.....   | 5         |
| Definición de conceptos.....   | 5         |
| Antecedentes.....  | 6         |
| Metodología.....   | 7         |
| Probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el territorio nacional .....   | 9         |
| Unidad de estudio.....   | 9         |
| Situación actual y pasada 2000-2020 .....  | 9         |
| Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en los años 2021-2025.....   | 11        |
| Pérdida de cobertura arbórea esperada.....   | 12        |
| <b>Pérdida de cobertura arbórea futura desagregada por regiones .....</b>  | <b>14</b> |
| Zona Pacífico Central.....   | 14        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020</i> .....  | 14        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea esperada</i> .....   | 15        |
| <i>Distribución de la predicción</i> .....   | 16        |
| <i>Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo</i> .....                                     | 18        |
| Zona Pacífico Sur .....  | 20        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020</i> .....  | 20        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea esperada</i> .....   | 21        |
| <i>Distribución de la predicción</i> .....   | 21        |
| <i>Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo</i> .....                                     | 24        |
| Zona Pacífico Norte.....   | 25        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020</i> .....  | 25        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea esperada</i> .....   | 26        |
| <i>Distribución de la predicción</i> .....   | 27        |
| <i>Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo</i> .....                                     | 29        |
| Zona Norte .....   | 31        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020</i> .....  | 31        |
| <i>Pérdida cobertura arbórea esperada</i> .....  | 32        |
| <i>Distribución de la predicción</i> .....   | 32        |
| <i>Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo</i> .....                                     | 35        |
| Zona Caribe .....  | 36        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020</i> .....  | 36        |
| <i>Pérdida de cobertura arbórea esperada</i> .....   | 37        |
| <i>Distribución de la predicción</i> .....   | 38        |
| <i>Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo</i> .....                                     | 41        |
| Resumen .....  | 42        |
| <b>Características generales de las zonas propensas a perder su cobertura arbórea en los próximos cinco años .....</b> | <b>43</b> |
| <b>Principales objetos de política pública para la reducción de la pérdida de cobertura arbórea .....</b>              | <b>47</b> |
| <b>Caso de estudio: Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en la zona de Sarapiquí.....</b>                     | <b>49</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introducción .....</b>  | <b>49</b> |
| <b>Objetivo.....</b>   | <b>49</b> |
| Pregunta general.....  | 49        |
| Preguntas específicas.....   | 49        |
| <b>Definición de conceptos.....</b>  | <b>50</b> |
| <b>Antecedentes.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>Metodología.....</b>  | <b>51</b> |
| <b>Probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en Sarapiquí .....</b>   | <b>53</b> |
| Unidad de estudio.....   | 53        |
| Situación actual y pasada 2000-2020 .....  | 54        |
| Predicción .....   | 56        |
| Pérdida de cobertura arbórea esperada.....   | 58        |
| Zonas calientes .....  | 59        |
| Zona 1.....  | 61        |
| Zona 2.....  | 62        |
| Zona 3.....  | 63        |
| Zona 4.....  | 64        |
| Zona 5.....  | 65        |
| Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo.....   | 66        |
| <b>Características generales de las zonas propensas a perder su cobertura arbórea en los próximos cinco años .....</b> | <b>68</b> |
| <b>Principales objetos de política pública para la reducción de la pérdida de cobertura arbórea .....</b>              | <b>71</b> |
| <b>Anexo metodológico .....</b>  | <b>73</b> |
| Fuentes de información.....  | 73        |
| Base de datos Global Forest Change (GFC).....  | 73        |
| Características de la base de datos .....  | 74        |
| Otras capas de información.....  | 76        |
| Ingeniería de variables .....  | 77        |
| Transformaciones básicas .....   | 77        |
| Operaciones con rásters .....  | 78        |
| Periodos de estudio y conjuntos de datos .....   | 80        |
| Algoritmo predictivo .....   | 81        |
| Modelado.....  | 81        |
| Características de los datos .....   | 82        |
| Variables utilizadas.....  | 83        |
| Distribución de las variables.....   | 84        |
| Resultados .....   | 88        |
| Métricas.....  | 89        |
| Contribución de variables.....   | 89        |
| <b>Referencias.....</b>  | <b>90</b> |

## Presentación

Esta Investigación se realizó para el *Informe Estado de la Nación 2021*. El contenido de la ponencia es responsabilidad exclusiva de su autor, y las cifras pueden no coincidir con las consignadas en el *Informe Estado de la Nación 2021* en el capítulo respectivo, debido a revisiones posteriores. En caso de encontrarse diferencia entre ambas fuentes, prevalecen las publicadas en el Informe.

## Introducción

El capítulo Armonía con la Naturaleza del *Informe Estado de la Nación* valora el desempeño ambiental de Costa Rica, desde la perspectiva del uso y la conservación de los recursos naturales, su sostenibilidad y el papel de los actores sociales e institucionales relacionados con esa gestión. Para ello, por un lado, sintetiza buena parte de los esfuerzos de investigación realizados por universidades públicas, entidades estatales, organizaciones no gubernamentales, sectores productivos y la sociedad civil, y por otro, desarrolla estudios propios con el objetivo de generar nueva información que permita profundizar el análisis sobre importantes desafíos en materia ambiental, así como herramientas para enriquecer el debate y apoyar la toma de decisiones en aspectos estratégicos para la sostenibilidad del desarrollo humano en general.

Esta investigación tiene como objetivo aplicar un instrumento de predicción de la pérdida de cobertura arbórea en el territorio nacional, a partir del uso de herramientas de aprendizaje automático *-machine learning-* y el uso de diversas variables de interés para mapear, analizar y explicar los resultados de dicha predicción.

Si bien en Costa Rica desde hace varias décadas se han impulsado esfuerzos tendientes a la recuperación, conservación y uso sostenible del bosque y los recursos forestales, persisten presiones que amenazan la sostenibilidad de los logros alcanzados en esta materia, así como la calidad de los ecosistemas presentes en el país. En situaciones de crisis, o ante el agotamiento y cambio de patrones productivos, de crecimiento urbano y de comercio, esas presiones pueden escalar. Es relevante para el país tener insumos de información que permitan diseñar políticas públicas basadas en evidencia, y dirigir esfuerzos en la política de conservación, de uso y de ordenamiento del territorio, para evitar una importante afectación sobre el patrimonio natural. En tal sentido, resulta importante aprovechar herramientas modernas de investigación para identificar la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea según la zona, pérdida de cobertura arbórea pasada, la capacidad de uso del suelo, las características geográficas del área, la pendiente, el costo del suelo, el tipo de bosque, la presencia de esquemas de protección, entre otras variables. Es de interés avanzar a modelos que permitan definir y explicar el riesgo de pérdida arbórea futura para ampliar este análisis.

En suma, con este estudio se busca aprovechar herramientas novedosas para la toma de decisiones y la formulación de política pública en este campo.

## Objetivo

El objetivo de esta investigación es aplicar un instrumento de predicción de la pérdida de cobertura arbórea futura en el territorio nacional, a partir del uso de herramientas de aprendizaje

automático *-machine learning-* y el uso de diversas variables de interés para mapear, analizar y explicar los resultados de dicha predicción. Consecuentemente, responderá a las siguientes preguntas:

### **Pregunta general**

- ¿Cuáles son los principales puntos geográficos en riesgo de pérdida de cobertura arbórea que se identifican en el territorio nacional para los próximos cinco años?

### **Preguntas específicas**

- ¿Cuál es la pérdida de cobertura arbórea esperada en el territorio nacional para los próximos cinco años?
- ¿Cómo se caracterizan las áreas críticas y cómo se clasifican según la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea futura?
- ¿Cuáles son las principales variables asociadas que implican presiones o factores que explican la probabilidad de pérdida arbórea futura en el país?
- ¿Cuáles son los principales objetos de política pública que deben considerarse para evitar o reducir la probabilidad de pérdida arbórea futura a nivel nacional?

### **Definición de conceptos**

#### **Áreas con cobertura arbórea**

Las áreas de cobertura arbórea consideradas en esta investigación son aquellas áreas de 30 x 30 m que cuentan con vegetación de una altura mayor a 5m<sup>1</sup> y esta cubre más del 30%<sup>2</sup> del área.

Si bien, por definición, esta base de datos no incluye cultivos de baja altura como piña, hortalizas, arroz, entre otros, en Costa Rica, la base de datos clasifica algunos cultivos en hileras y perennes como bananos, palma aceitera y café como con cobertura arbórea (Cunningham, Cunningham, & Fagan, 2019). Por ende, se debe ser consciente que esta información incluye sesgos de clasificación y se debe tomar en cuenta que la cobertura arbórea incluye otras coberturas adicionales a la cobertura boscosa.

#### **Pérdida de cobertura arbórea**

Corresponde a la pérdida total de cobertura arbórea en un área de 30 x 30 m. Se debe considerar que esta pérdida puede ser causada por fenómenos naturales o antropogénicos tales como deforestación, incendios, deslizamientos y corta de plantaciones forestales. Una vez que se identifica una pérdida, esa área queda marcada como pérdida, aunque posteriormente fuese reforestada.

En esta investigación no se contabiliza la ganancia de cobertura arbórea en ningún caso, esto implica que actividades como la reforestación, regeneración natural o siembra de cultivos forestales no son tomados en cuenta.

### Línea base

Los datos toman como punto de partida la cobertura arbórea del año 2000. De esta manera, cuando se registra un punto con pérdida esto quiere decir que un área con cobertura arbórea superior al 30% identificada en el 2000 fue eliminada totalmente en un año específico.

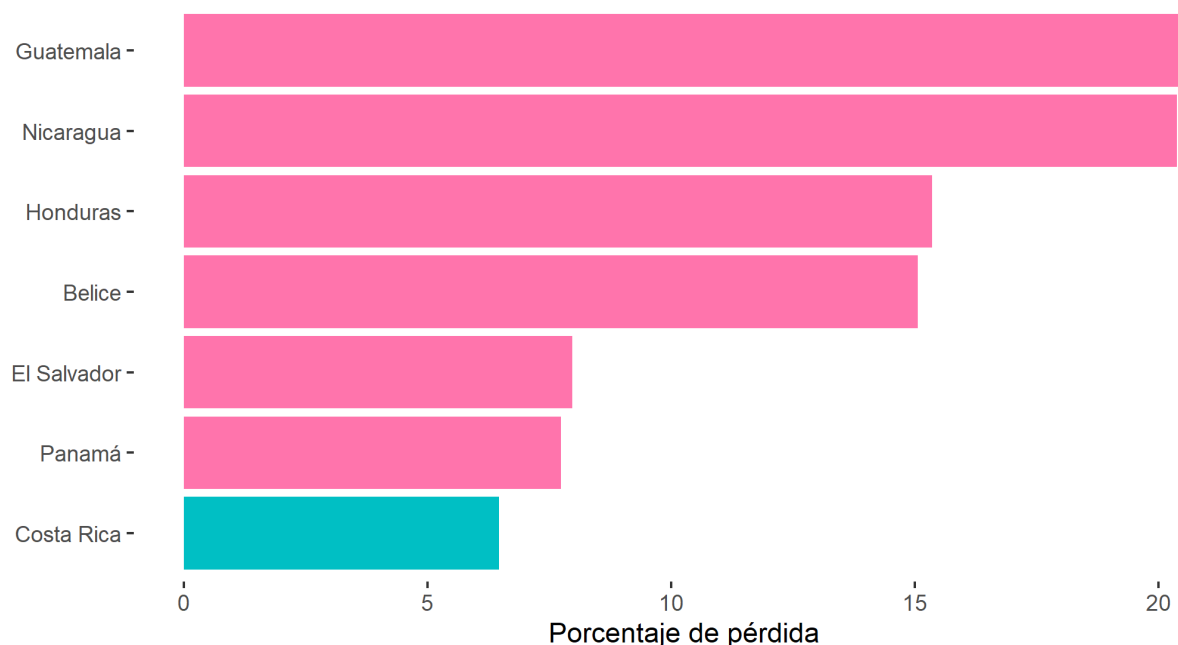
### Antecedentes

En sus inicios, Costa Rica fue un territorio prácticamente libre de deforestación. A partir de la década de los cincuenta la deforestación inició a un ritmo creciente llegando a un pico en la década de los ochentas (FAO, 2015) ,desde entonces, la deforestación ha ido en decrecimiento. A partir del año 2000, el área forestal ha aumentado hasta alcanzar cerca del 54% de la cobertura nacional en el 2015 (FAO, 2016).

A pesar de haber tenido una ganancia forestal neta positiva y ser el país centroamericano con el menor porcentaje de pérdida de cobertura arbórea en los últimos 20 años, el organismo Global Forest Change (GFC) detectó una pérdida de cobertura arbórea de 2.532 km<sup>2</sup> (Universidad de Maryland, Global Forest Change, 2021) durante los años 2000 y 2020.

Gráfico 1

#### Porcentaje de pérdida de cobertura arbórea en Centroamérica<sup>a/</sup>. 2000-2020



a/ Con base en la cobertura arbórea mayor al 30% encontrada en el año 2000.

Fuente: Global Forest Change, 2021.

Esta pérdida mal gestionada afecta negativamente la producción y el consumo sostenible, la conservación de la biodiversidad, los diversos servicios ecosistémicos que brindan a las

comunidades y la mitigación y adaptación de cambio climático. Por ende, conocer la ubicación de las zonas más vulnerables a perder su cobertura arbórea es vital para promover el desarrollo sostenible. A pesar de ello, en Costa Rica estas zonas no se encuentran identificadas y por lo tanto dificultan un enfoque estratégico de los recursos disponibles.

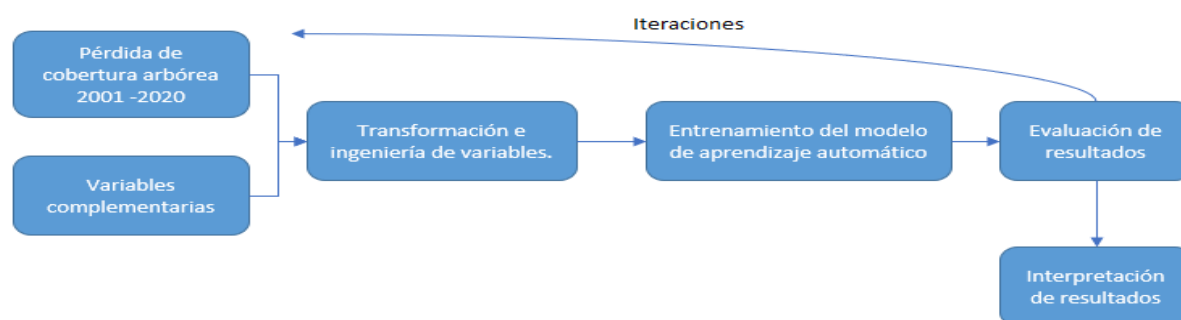
En Costa Rica la pérdida boscosa está asociada a diferentes factores como la accesibilidad, competencia de las actividades económicas alternativas a la conservación, el régimen de la tenencia, concentración de la deforestación, entre otros (MINAE, 2015). Muchos de estos factores junto con los patrones de pérdida pasada tienen componentes o estimadores que pueden representarse como una serie de tiempo de capas geográficas.

Esta información permite crear modelos basados en datos que aprenden de comportamientos pasados y permiten predecir la magnitud y ubicación de pérdida de cobertura arbórea futura. Modelos de esta categoría se han aplicado en diferentes partes del mundo como Borneo<sup>3</sup>, Belice<sup>4</sup>, Indonesia<sup>5</sup>, Vietnam<sup>6</sup>, entre otros. Históricamente el modelo más comúnmente utilizado para la predicción de pérdida boscosa es la regresión logística (Cushman, Macdonald, Landguth, Malhi, & Macdonald, 2017), sin embargo, debido a los avances en la capacidad de procesamiento y en las técnicas de aprendizaje automático, es posible implementar modelos con un grado mayor de complejidad que resulten en predicciones con mayor precisión.

Esta investigación es una primera aproximación para predecir la pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica utilizando modelos no paramétricos complejos de aprendizaje automático -ensamble basado en árboles de decisión- en conjunción con la base de datos GFC y otras fuentes de información pública. Por limitaciones en la base de datos y la metodología empleada, las predicciones están limitadas a la pérdida de cobertura de arbórea que puede incluir otras coberturas diferentes a bosques y a un horizonte predictivo de 5 años. Futuros análisis podrán hacer uso de otras bases de datos, cruzar información para encontrar impactos en áreas y usos del suelo específicos o implementar diferentes modelos para comparar o mejorar las métricas alcanzadas en esta investigación.

## Metodología

En este apartado se describe brevemente<sup>7</sup> el procedimiento realizado para entrenar y aplicar un algoritmo de aprendizaje automático supervisado que predice la pérdida de cobertura arbórea durante el periodo de 2021 al 2025 en Costa Rica mediante la identificación de relaciones multivariadas complejas.





En primer lugar, se utilizaron diferentes bases de datos de acceso público siendo la más relevante la base de datos del GFC, publicada originalmente por Hansen y otros (2013) y mantenida por la Universidad de Maryland y GFC (2021). La selección de esta fuente respecto a otras posibles tiene que ver, entre otros aspectos, con que es de acceso público, cuenta con datos de la cobertura arbórea global durante las últimas dos décadas, con una frecuencia anual, con una resolución de 30x30 metros y que se ha calculado su precisión en Costa Rica. Dicha base se construyó con las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y desde el 2013 Landsat 8

Es importante mencionar que las áreas con cobertura arbórea pueden incluir bosques, humedales, plantaciones forestales y algunos cultivos en hileras y perennes como bananos, palma aceitera y café (Cunningham, Cunningham, & Fagan, 2019). Tal base de datos está sujeta a una incertidumbre propia de 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- cercana al 80% y es la mejor en comparación con las otras dos bases de datos analizadas por Cunningham, Cunningham, & Fagan, 2019 en Costa Rica.

Junto con esta base de datos se recopiló información relevante de otras fuentes como el índice de desarrollo social, la capacidad del uso del suelo, elevación, pendiente, cercanía a carreteras, ríos, poblados, entre otros.

La información fue transformada mediante un proceso denominado ingeniería de variables y agrupada por quinquenios para favorecer el aprendizaje automático, que consiste en un proceso mediante el cual 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, Soukhavong, & Lamb, 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 bajo la curva ROC - *Receiver Operation Characteristic*- promedio de 0,7 en el territorio nacional. Esta métrica provee una medida agregada del desempeño del modelo a través 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 un 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 a predecir que deberán ser tomados en cuenta a la hora de utilizar los resultados de esta investigación.

Finalmente, los resultados fueron interpretados para confirmar la correcta ejecución del modelo y brindar conocimientos adicionales a las propias predicciones. En esta fase se aplicó la

metodología de “Valores Shapley” (Lundberg & Lee, 2017) y se caracterizaron las predicciones basadas en diversas variables de interés.

## **Probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el territorio nacional**

### **Unidad de estudio**

La predicción de la pérdida arbórea se realizó Costa Rica continental<sup>8</sup> la cual cuenta con un área de 51.073 km<sup>2</sup> a una escala de 30 x 30 m.

Mapa 1

**Unidad de estudio: Costa Rica continental**



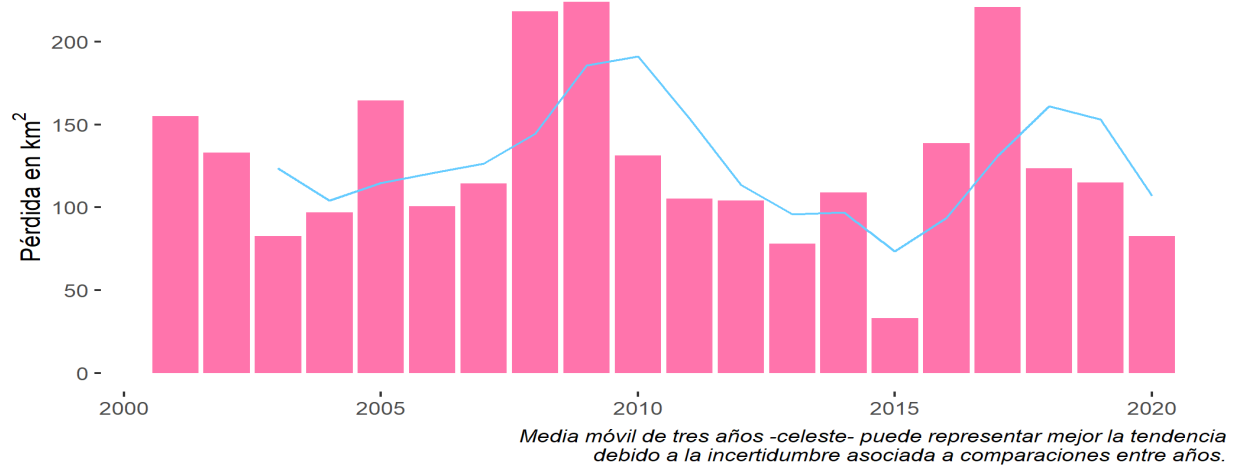
Fuente: Elaboración propia.

### **Situación actual y pasada 2000-2020**

De acuerdo con la información del GFC, Costa Rica poseía un 76,7% -39.174 km<sup>2</sup>- de su territorio con cobertura arbórea en el año 2000. Del año 2001 al 2020, Costa Rica ha perdido un estimado de 2.530 km<sup>2</sup> de tal área -sin considerar ganancias de cobertura arbórea-. Esto equivale a un 6,45% de la cobertura arbórea encontrada en el año 2000.

Gráfico 2

**Pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica. 2000-2020**

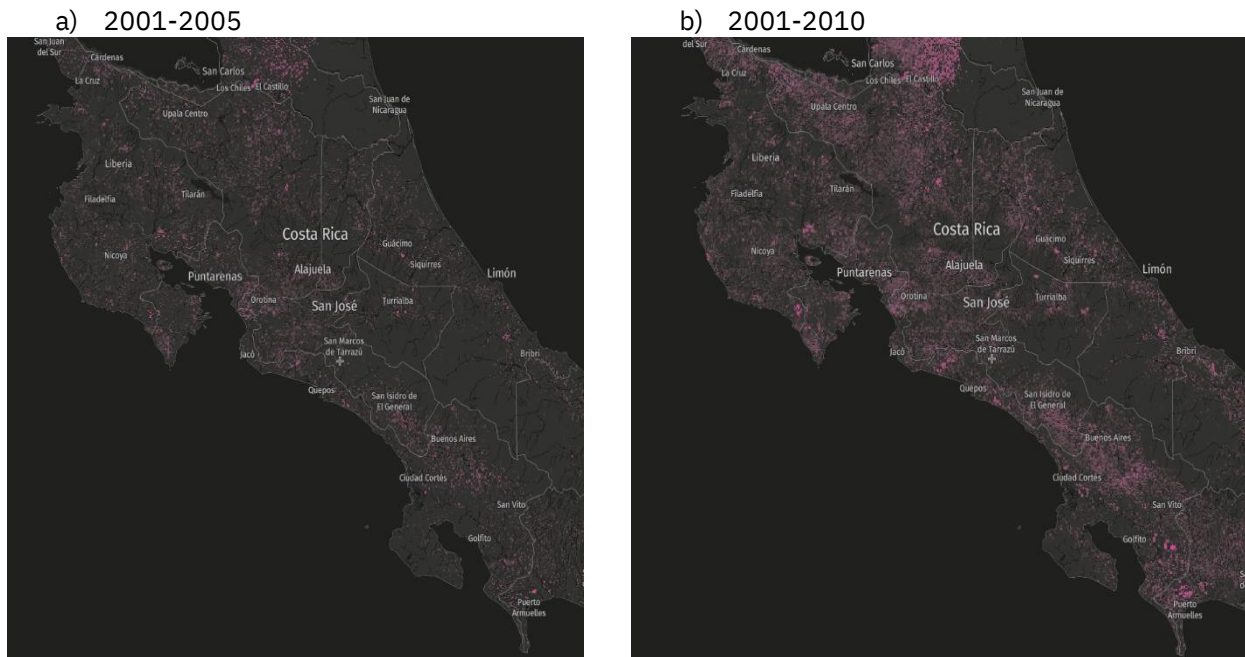


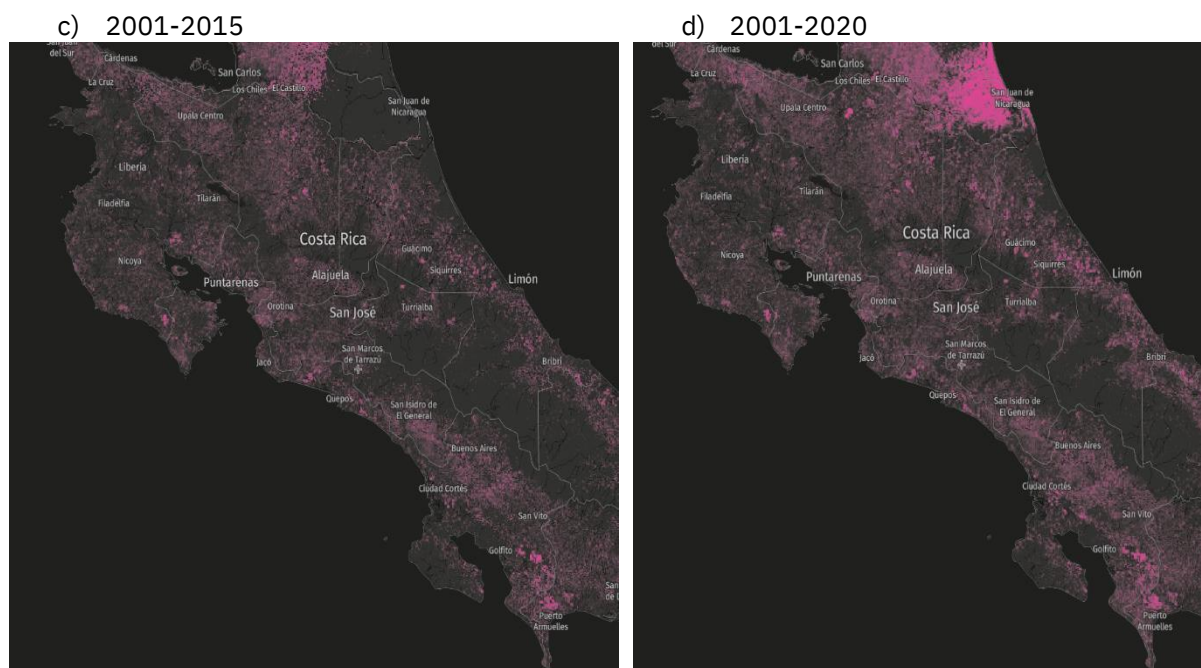
Fuente: GFC, 2021.

Tal y como se observa en el gráfico 2, la pérdida de cobertura arbórea tiene una alta dispersión en el tiempo con una leve tendencia a la baja. Espacialmente, esta pérdida se puede ver en los mapas 2 que representan en rosado la pérdida de cobertura arbórea acumulada en el país en los últimos cuatro quinquenios.

Mapas 2

**Pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica**





Fuente: GFC, 2021.

Las imágenes anteriores muestran como las pérdidas de cobertura arbórea de cada quinquenio tienen una asociación con patrones pasados. Es evidente que algunas zonas -como Ciudad Neily- se expanden a lo largo de los años indicando una concentración de la pérdida. Adicionalmente, áreas protegidas como las partes altas de la Cordillera Volcánica de Talamanca, Central y Guanacaste tienen una menor pérdida registrada en los últimos 20 años que otras regiones.

### **Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en los años 2021-2025**

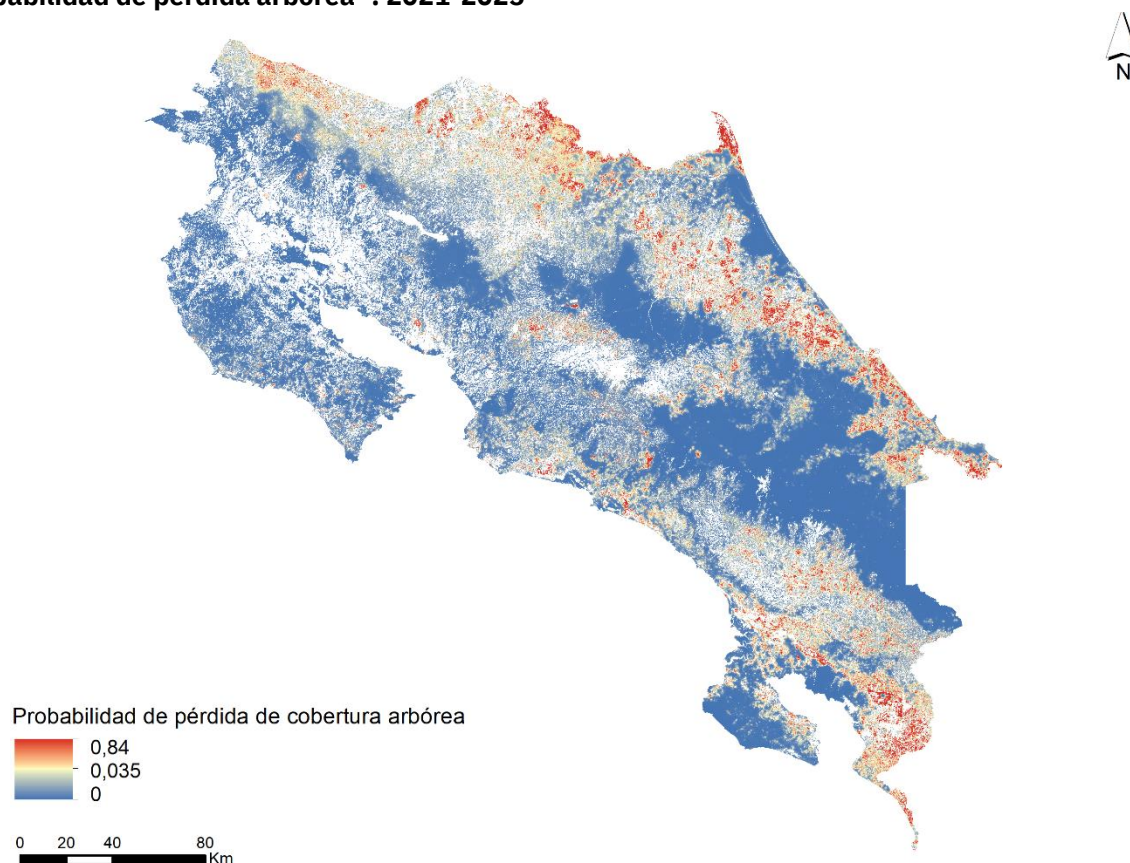
Cada punto del país con cobertura arbórea tiene asociado un nivel de riesgo de perderla en el futuro. La pérdida puede ocurrir por eventos naturales como deslizamientos, eventos hidrometeorológicos o variaciones climáticas y antropogénicas como la deforestación, rotación y corta de cultivos, incendios inducidos, entre otros.

Puesto que una parte de tal riesgo está asociado al comportamiento del entorno de cada punto y de sus características individuales tanto en el presente como en el pasado, es posible utilizar algoritmos complejos de aprendizaje automático que analicen tales variables y predigan la probabilidad de perder la cobertura arbórea en el futuro. Luego de aplicar, validar y probar un algoritmo de aprendizaje automático, se estimó la probabilidad de perder la cobertura arbórea en los próximos 5 años para todas las áreas de 30 x 30 m en el territorio nacional.

En el mapa 3 se pueden apreciar las probabilidades de la pérdida arbórea durante el periodo 2021 - 2025. En este destacan zonas con baja probabilidad de perder su cobertura arbórea que están asociadas a zonas con pendientes elevadas, terrenos con una baja vocación agropecuaria<sup>9</sup> y a áreas protegidas como el Parque Nacional Tortuguero, Braulio Carrillo, La Amistad y Corcovado.

Mapa 3

**Probabilidad de pérdida arbórea<sup>a/</sup>. 2021-2025**



a/ Colores rojizos indican una mayor probabilidad y azules una menor probabilidad.

En caso contrario, las áreas en riesgo de perder su cobertura arbórea en el periodo 2021 al 2025 se concentran en zonas asociadas a bajas pendientes y elevaciones, bajas limitaciones agropecuarias y presencia de monocultivos como la piña, palma aceitera y banano. Destacan zonas en el cantón de San Carlos, Los Chiles, Pococí, Buenos Aires, Osa, Talamanca, La Cruz, Matina, Siquirres y Guácimo.

**Pérdida de cobertura arbórea esperada**

De acuerdo con la probabilidad estimada para cada píxel de 30 x 30m, se espera que durante el año 2021 y hasta el 2025 ocurra una pérdida cobertura arbórea cercana a los 515 km<sup>2</sup> en todo el país. Esta pérdida corresponde a un 1,40% de la cobertura arbórea nacional.

La predicción muestra un escenario positivo en relación con las pérdidas registradas en el pasado. La pérdida esperada para el quinquenio 2021-2025 es un 24% menor respecto al periodo anterior y es inferior al promedio registrado en las últimas dos décadas -633km<sup>2</sup> en Costa Rica.

A nivel centroamericano, la pérdida porcentual esperada se considera baja ya que es menor que las pérdidas promedio registradas en los últimos cuatro quinquenios en todos los países (cuadro 1).

Cuadro 1

**Pérdida porcentual de la cobertura arbórea promedio cada cinco años en países centroamericanos**

| País               | Pérdida porcentual promedio por quinquenios |
|--------------------|---|
| <b>Guatemala</b>   | 5,65 %                                      |
| <b>Nicaragua</b>   | 5,64%                                       |
| <b>Honduras</b>    | 4,15%                                       |
| <b>Belice</b>      | 4,00%                                       |
| <b>El Salvador</b> | 2,06%                                       |
| <b>Panamá</b>      | 2,00%                                       |
| <b>Costa Rica</b>  | 1,66%                                       |

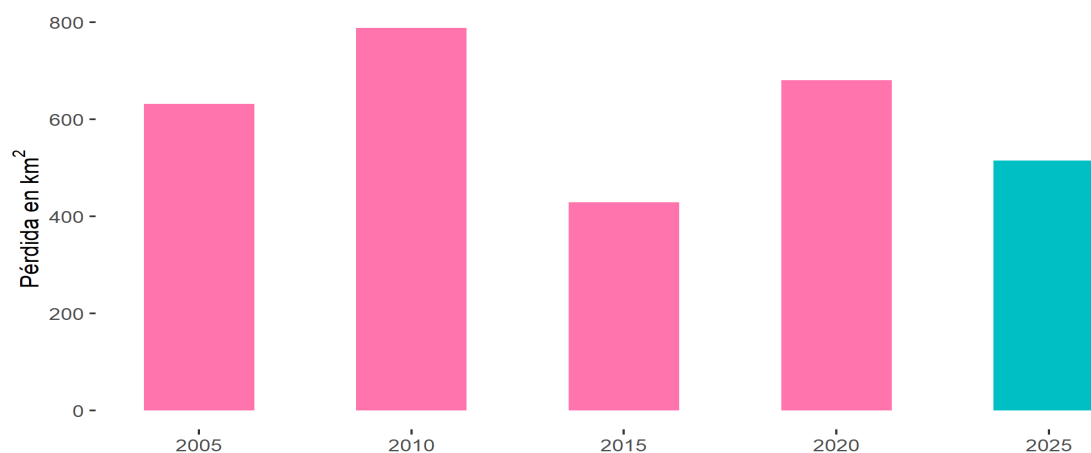
Fuente: Elaboración propia con datos de GFC, 2021.

A pesar de que la pérdida esperada se considera baja en relación con otros períodos y países, los impactos de esta pérdida arbórea podrían ser vastos y dependientes de las características del área donde ocurran -bosques, humedales, plantaciones forestales, trama verde urbana, entre otros-. La pérdida mal gestionada atentará contra los ecosistemas que albergan, la adaptación y mitigación del cambio climático, el desarrollo sostenible y los variados servicios ecosistémicos que brindan a las comunidades.

A continuación, se presenta una figura con la pérdida de cobertura arbórea<sup>10</sup> registrada por quinquenios en los últimos 20 años y la predicción del periodo 2021-2025.

Gráfico 2

**Pérdida de cobertura arbórea por quinquenios<sup>a/</sup> en Costa Rica**



a/ Rosado: pérdida observada, Celeste: pérdida esperada.

Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

## Pérdida de cobertura arbórea futura desagregada por regiones

Los resultados presentados en el apartado “Probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el territorio nacional” fueron desagregados en cinco regiones que coinciden con las Unidades Hidrológicas definidas por la Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía: Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Zona Norte y Caribe. Esta desagregación permite realizar un análisis más detallado, obtener métricas y evidencia que soporten una gestión regionalizada (mapa 4).

Mapa 4

### Regiones hidrológicas de Costa Rica en estudio



### Zona Pacífico Central

La Zona Pacífico Central tiene un área de 5.901 km<sup>2</sup> y comprende las cuencas: Barranca, Jesús María, Tárcoles, Tusubres, Parrita, Damas y Naranjo. Esta región incluye los principales núcleos urbanos de San José, Heredia y Alajuela.

### Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020

De acuerdo con la información del GFC, la región Pacífico Central poseía un 73,9% -4.360 km<sup>2</sup>- de su territorio con cobertura arbórea en el año 2000. De 2001 a 2020, esta región ha perdido 308,3 km<sup>2</sup> de tal área -sin considerar ganancias de cobertura arbórea-. Esta pérdida equivale a

un 7,07 % de la cobertura arbórea encontrada en el año 2000 la cual es superior al porcentaje pérdida nacional -6,45%-.

Gráfico 3

**Pérdida de cobertura arbórea en Pacífico Central. 2000-2020**



Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

Tal y como se observa en el gráfico 3, la pérdida de cobertura arbórea tiene una tendencia a la baja significativa. La pérdida estuvo marcada por dos picos alrededor del año 2000 y el 2009 que no han sido superados desde entonces.

***Pérdida de cobertura arbórea esperada***

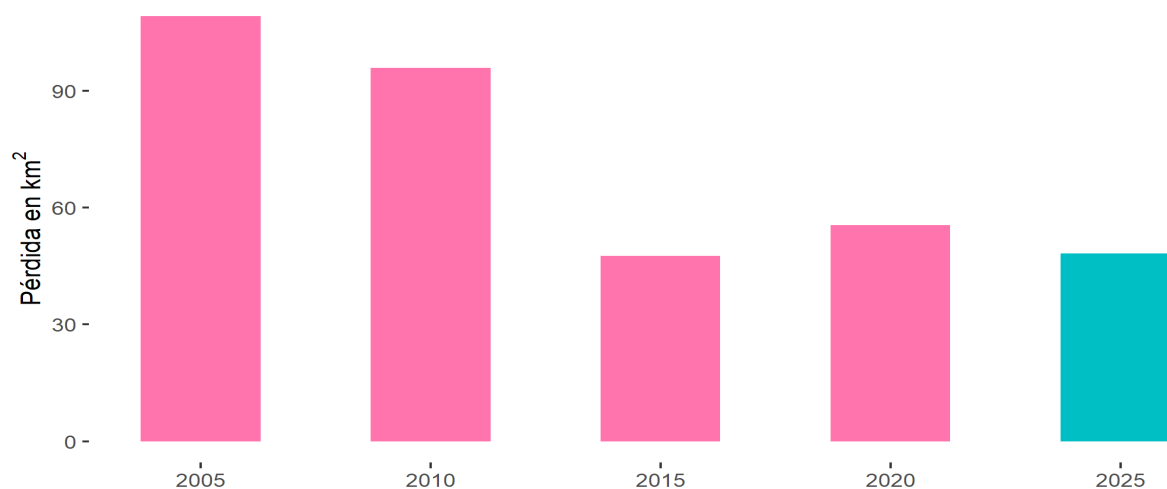
De acuerdo con la metodología detallada en los anexos, se espera que durante el año 2021 y 2025 ocurra una pérdida de cobertura arbórea cercana a los 48 km<sup>2</sup>. En términos porcentuales, la región experimentará una disminución del dosel arbóreo de 1,19% la cual es inferior al porcentaje de pérdida nacional.

La predicción indica que la zona Pacífico Central tendrá una pérdida muy similar a la más baja de los últimos cuatro quinquenios y mantendrá la tendencia bajista observada en el pasado.



Gráfico 4

**Pérdida de cobertura arbórea por quinquenios<sup>a/</sup> en Pacífico Central**



a/ Rosado: pérdida observada, Celeste: pérdida esperada.

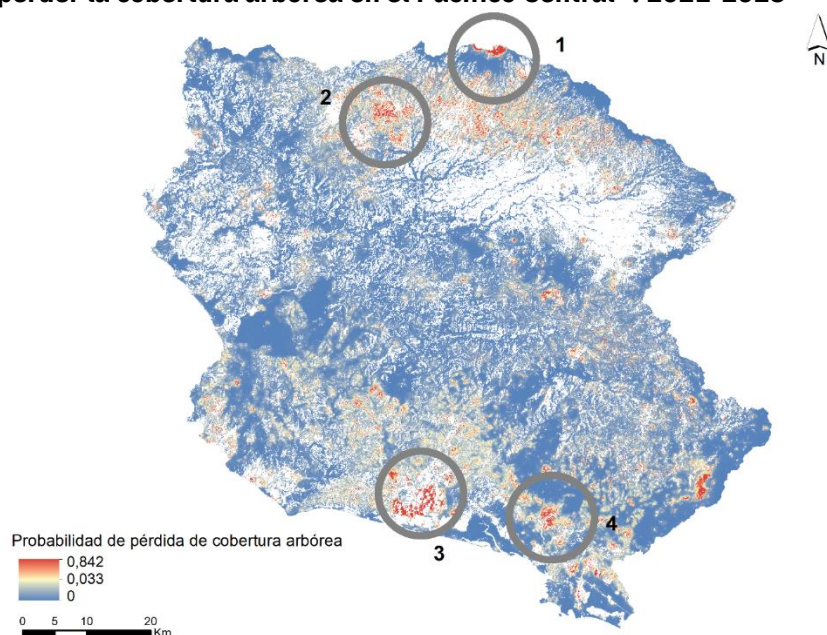
Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

***Distribución de la predicción***

La probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el horizonte predictivo se distribuye espacialmente según el mapa 5.

Mapa 5

**Probabilidad de perder la cobertura arbórea en el Pacífico Central<sup>a/</sup>. 2021-2025**



a/ Zonas rojizas indican regiones con una mayor susceptibilidad a perder cobertura arbórea y las azules una menor disposición.

Fuente: Elaboración propia.

En la Zona Pacífico Central destacan áreas con bajas probabilidades de pérdida en zonas como el Parque Nacional Carara, la Zona Protectora de Cerros Turrubares, Parque Nacional la Cangreja, Zona Protectora de los Cerros de Escazú, el Refugio Nacional de Vida Silvestre Cerro Redondo y sus alrededores. En el caso contrario, resaltan áreas en el norte de la ciudad de Alajuela, Heredia, Naranjo y Grecia. También existe un conglomerado importante en la zona costera cerca de Parrita y San Rafael de Quepos.

A continuación, se describirán brevemente cuatro áreas delimitadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para contar con un panorama general de la zona.

La zona 1 se ubica en un radio menor a 5 km del cráter del Volcán Poás dentro del Parque Nacional Volcán Poás y la Reserva Forestal Grecia. El volcán ha presentado actividad volcánica importante en los últimos cuatro años y fotografías satelitales<sup>14</sup> del 2020 muestran procesos asociados a la pérdida de cobertura arbórea naturales producto de la actividad volcánica.

La zona 2 se ubica en las cercanías de la ciudad de Naranjo y es parte de la franja ubicada en las faldas del Volcán Poás y el Volcán Barva. Esta zona se caracteriza por su cercanía a centros poblaciones y presencia de diversos cultivos como el café. La cobertura arbórea está altamente fraccionada y es común que se concentre en sitios cercanos a cauces.

Al sur, la zona 3, es una región en las cercanías de Parrita en donde existe una alta concentración de cultivos de palma y arroz y ganadería que ejercen presión sobre las coberturas arbóreas actuales.

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

Todas estas zonas tienen probabilidades altas de modificar su cobertura actual, sin embargo, los factores que ejercen presión son de índole distinto. En la zona 1 la causa observada es de tipo volcánico, mientras que en la zona 2 la causa está asociada a la expansión de la mancha urbana y a cultivos de café, en la región 3 y 4 a monocultivos extensivos de palma y arroz y ganadería.

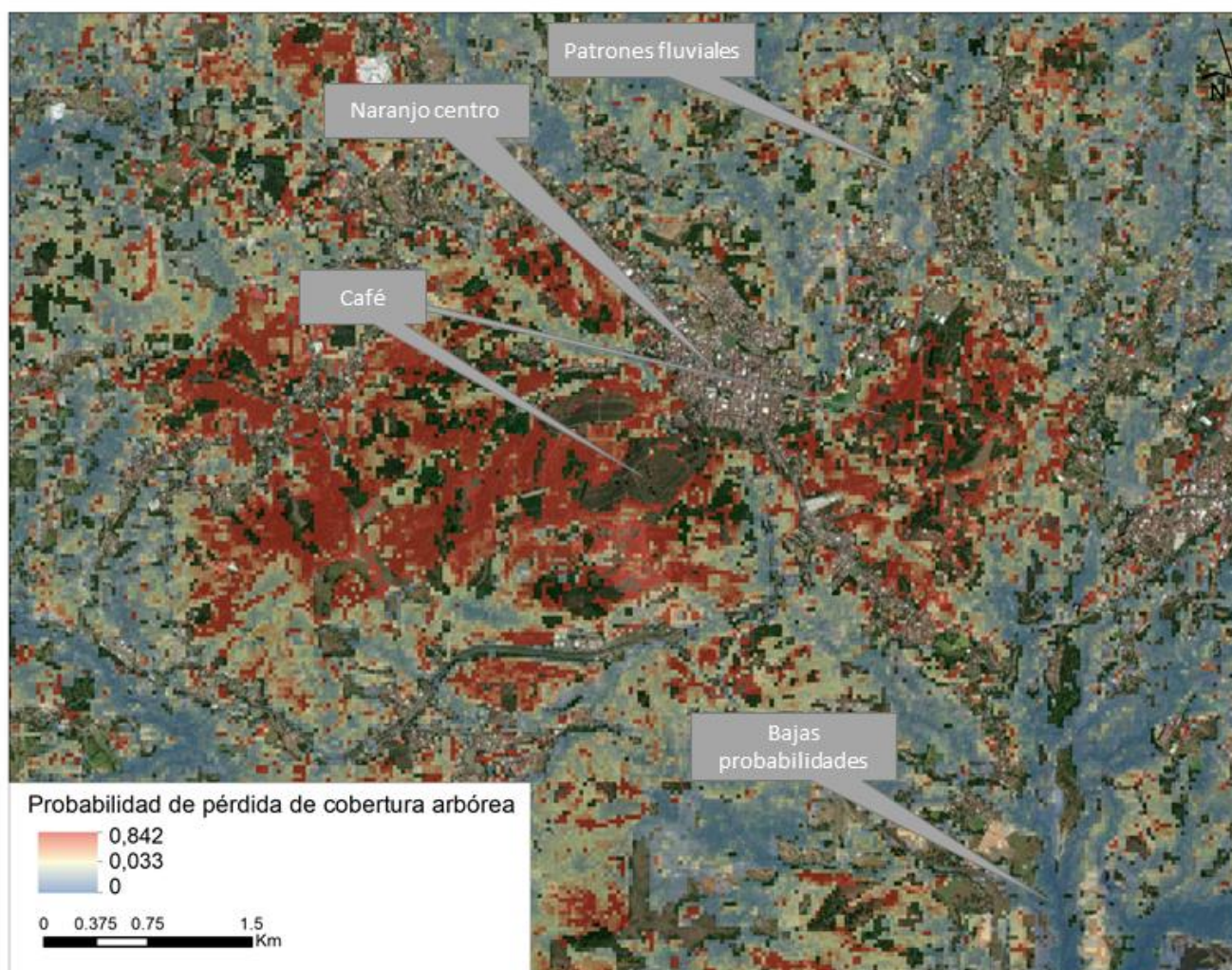
#### *Zona caliente: Naranjo de Alajuela*

Con el fin de ejemplificar la predicción en detalle se realizó un acercamiento a la ciudad de Naranjo de Alajuela que se ubica dentro de un conglomerado con altas probabilidades de pérdida arbórea en el sector norte de la región Pacífico Central.

En el mapa 6 se pueden apreciar dos núcleos de alta probabilidad de pérdida de cobertura arbórea importantes al oeste y este de la ciudad de Naranjo. Ambas zonas cuentan con parches boscosos aislados y plantaciones cafetaleras con diferentes proporciones de árboles que brindan sombra a los cultivos. En contraste con los conglomerados de probabilidades altas se pueden apreciar áreas con bajas probabilidades de perder su cobertura actual que tienen patrones fluviales que corresponden a ecosistemas ribereños en las zonas de protección de ríos y quebradas.

Mapa 6

**Detalle de la probabilidad de pérdida arbórea en la zona caliente: Naranjo**



Fuente: Elaboración propia con datos de Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID y la Comunidad usuaria SIG, 2021.

La interpretación de imágenes satelitales<sup>12</sup> del año 2021 indica una presión en la pérdida de cobertura arbórea producto de desarrollos habitacionales y prácticas relacionadas con la poda y siembra de café.

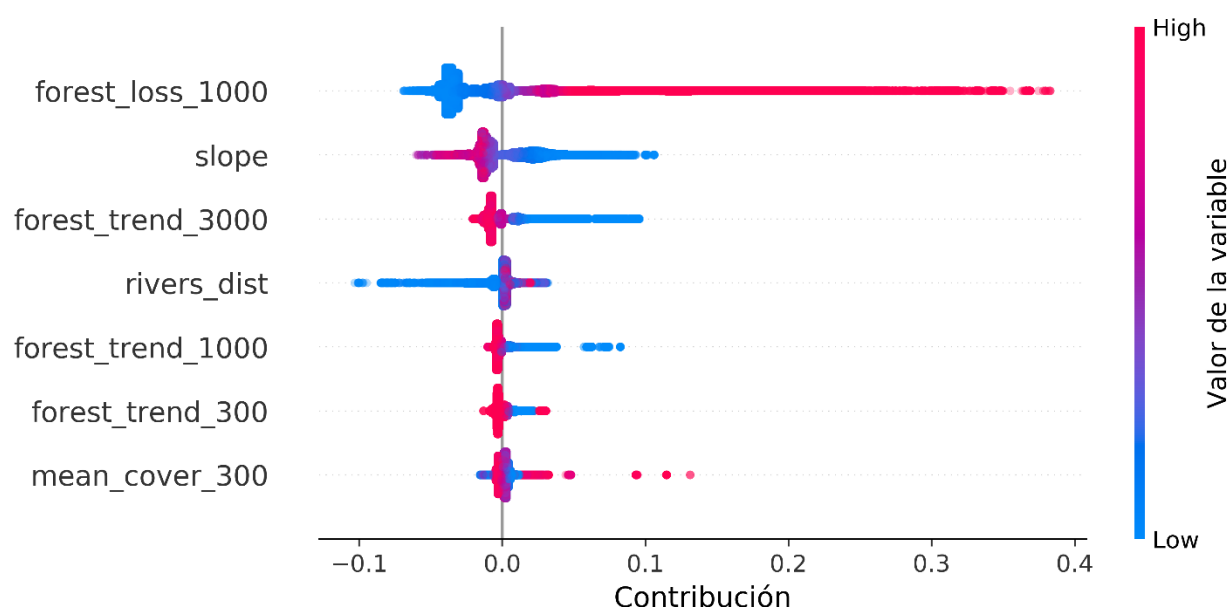
***Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo***

Si bien la predicción de la pérdida de cobertura arbórea es de gran utilidad puesto que permite cuantificar y localizar la pérdida arbórea para la toma de decisiones, también es relevante cuantificar el aporte relativo de las variables<sup>13</sup> más importantes utilizadas en el modelo. Tal cuantificación permite validar el funcionamiento del modelo y brindar información clara para el entendimiento de los factores que impactan de mayor manera en la predicción de pérdida arbórea.

En el gráfico 5 se visualiza en el eje “x” la contribución marginal de las siete variables con mayor impacto promedio en el modelo. Las contribuciones positivas indican aportes a favor de la pérdida de cobertura arbórea y viceversa. Por otro lado, los valores altos de las variables están coloreados en rosado y los valores bajos en azul. La cantidad de observaciones -áreas de 30 x30m- de cada variable se ve reflejada en la amplitud del eje “y”.

Gráfico 5

**Contribución de las variables<sup>a/</sup> a la predicción en Región Pacífico Central**



a/ Variables ordenadas en orden descendente según su impacto promedio en el modelo.

En esta región, las tres variables con mayores contribuciones son:

1. Pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a un kilómetro alrededor de cada punto de estudio -*forest\_loss\_1000*-. En general, cuanto mayor es la pérdida registrada en su entorno, mayor es la contribución para perder su propia cobertura en el futuro.
2. Pendiente del terreno -*slope*-. Regularmente pendientes bajas colaboran de manera positiva a la probabilidad de perder la cobertura arbórea y viceversa.
3. Tendencia de la cantidad de la cantidad de áreas con cobertura arbórea en los últimos cinco años a tres kilómetros alrededor de cada punto de estudio -*forest\_trend\_3000*-. En general, cuanto más negativa sea la tendencia registrada en su entorno, mayor es la contribución para perder su propia cobertura en el futuro y viceversa.

Cinco de las siete variables más importantes corresponden a modificaciones y características de la cobertura del suelo de áreas cercanas y en el área individual de estudio. Adicional a ellas, juegan un rol importante la pendiente -*slope*- y la distancia a los ríos -*rivers\_dist*-. La variable de la distancia a los ríos muestra como las zonas muy cercanas a los ríos contribuyen a la conservación de su cobertura arbórea lo cual es un indicador de que las zonas de protección de

los ríos son respetadas. Por otro lado, en general, pendientes menores aportan a la pérdida de cobertura arbórea y viceversa lo cual es de esperar pues los terrenos planos son más apetecidos por los desarrollos urbanísticos y agropecuarios.

## Zona Pacífico Sur

La Zona Pacífico Sur tiene un área de 10.213 km<sup>2</sup> y comprende las cuencas: Savegre, Barú, Térraba, Esquinas y Península de Osa. Esta región incluye centros poblacionales como San Isidro de El General y Buenos Aires. También alberga importantes sitios de protección como el Parque Nacional Corcovado, Piedras Blancas y sectores del Chirripó y La Amistad.

### **Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020**

De acuerdo con la información del GFC, la región Pacífico Sur poseía un 83,1% -8.487 km<sup>2</sup>- de su territorio con cobertura arbórea en el año 2000. De 2001 a 2020, esta región ha perdido 609 km<sup>2</sup> de tal área -sin considerar ganancias de cobertura arbórea-. Esta pérdida equivale a un 7,18 % de la cobertura arbórea encontrada en el año 2000 la cual es superior al porcentaje pérdida nacional -6,45%-.

Gráfico 6

### **Pérdida cobertura arbórea en Pacífico Sur. 2000-2020**



Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

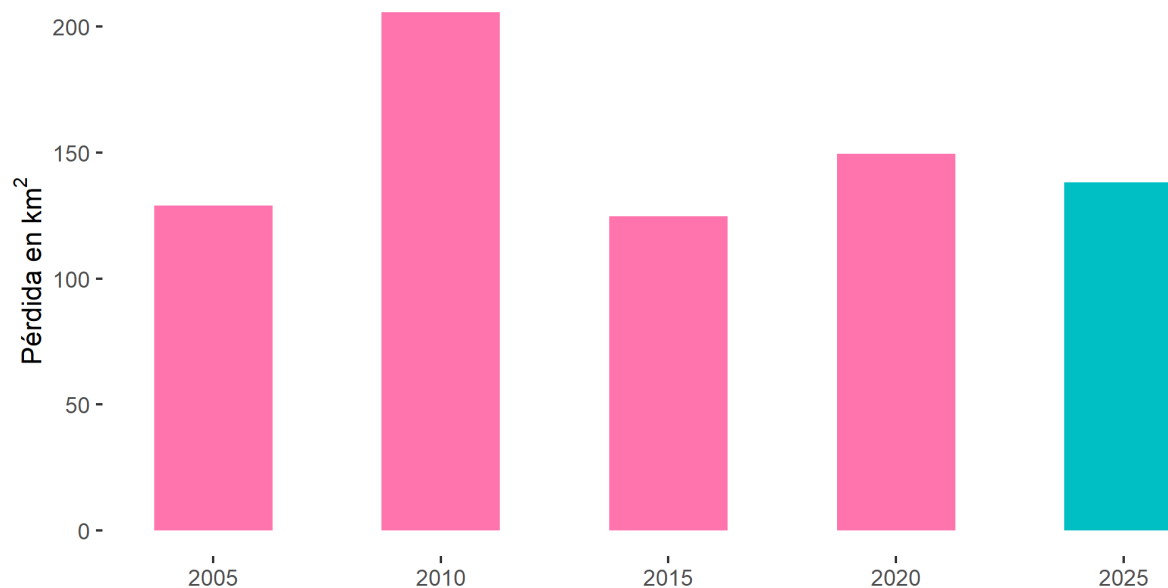
Tal y como se observa en el gráfico 6, la pérdida de cobertura arbórea muestra una tendencia relativamente estable a excepción de un pico alrededor de 2009.

### ***Pérdida de cobertura arbórea esperada***

De acuerdo con la metodología detallada en los anexos, se espera que entre el año 2021 y 2025 exista una pérdida de cobertura arbórea cercana a los 138 km<sup>2</sup>. En términos porcentuales la pérdida esperada es del 1,75% de la cobertura en el 2020. Tal porcentaje es mayor que el promedio nacional y solamente es superado por el de la Zona Norte.

Gráfico 7

### **Pérdida de cobertura arbórea observada y esperada en el Pacífico Sur**



α/ Rosado: pérdida observada, Celeste: pérdida esperada.

Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

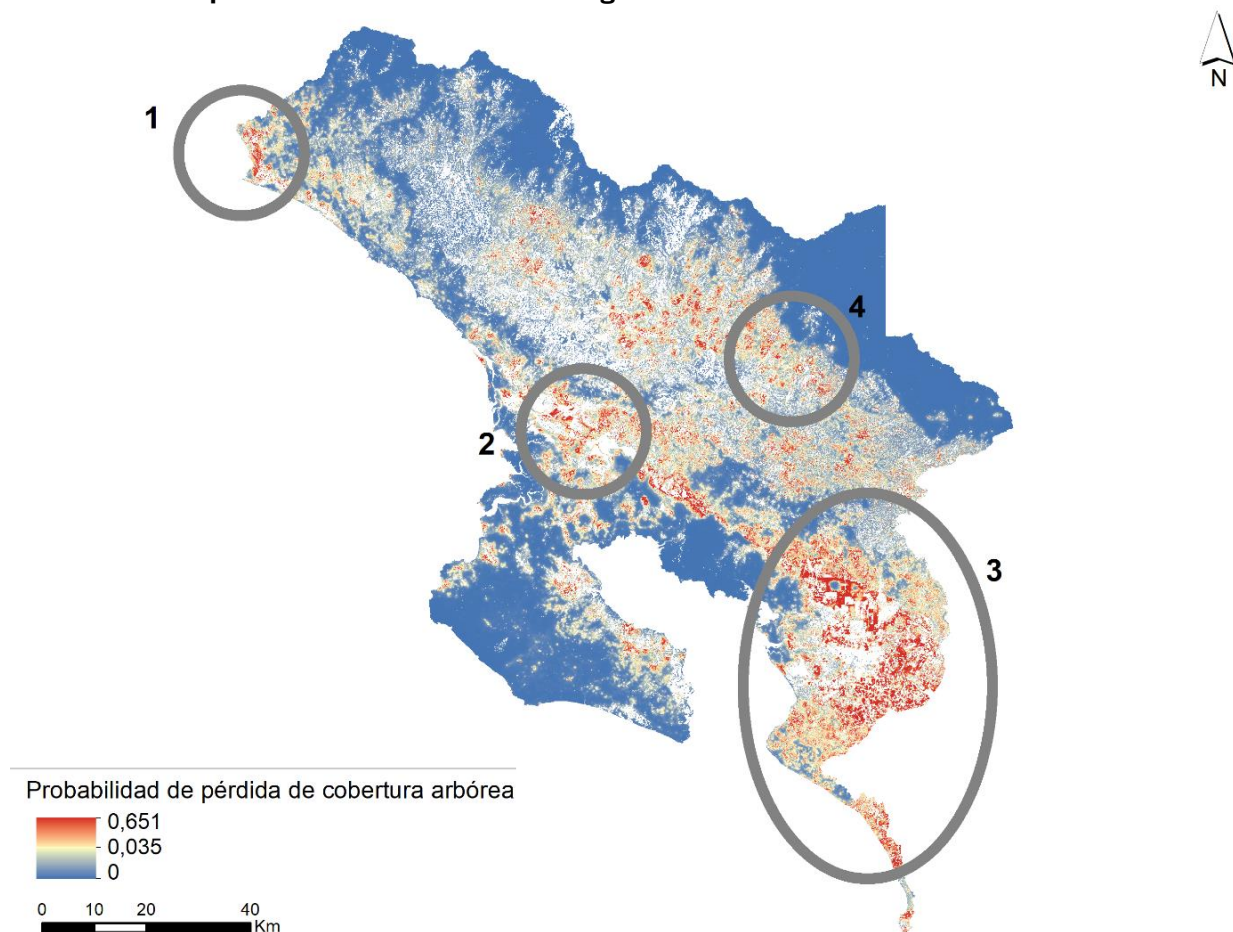
A pesar de ser la mayor pérdida en términos porcentuales, se considera que es una pérdida estable en su región ya que presenta un decrecimiento muy bajo -7,6%- respecto al quinquenio anterior.

### ***Distribución de la predicción***

El valor esperado de pérdida de cobertura arbórea se distribuye espacialmente. El mapa 7 muestra claramente como las zonas que se encuentran en un régimen de protección ambiental como los Parques Nacionales de La Amistad, Corcovado y Piedras Blancas tienen un riesgo mucho menor que otras áreas.

Mapa 7

**Probabilidad de perder el dosel arbóreo de la región Pacífico Sur<sup>a/</sup>. 2021-2025**



a/ Zonas rojizas indican regiones con una mayor susceptibilidad a perder su cobertura arbórea y las azules una menor disposición.

Fuente: Elaboración propia.

En la región Pacífico Sur resaltan zonas con una elevada probabilidad de perder su cobertura arbórea en áreas con bajas elevaciones que inician en Quepos y continúan hasta Punta Burica. Adicionalmente existe una franja en riesgo en las elevaciones medias y bajas de los distritos de Biolley, Potrero Grande, Buenos Aires y Brunca.

A continuación, se describirán brevemente cuatro áreas delimitadas en el mapa 7 para contar con un panorama general de la zona.

La zona 1 se ubica en las cercanías de la Ciudad de Quepos, la zona 2 en Ciudad Cortés y la zona 3 contiene a Ciudad Neilly y la mayor parte de Punta Burica. Es evidente que las zonas 2 y 3 están unidas por un área rojiza en sentido noroeste-sureste que corresponde a la carretera Interamericana. Estas tres zonas tienen características similares en cuanto a bajas pendientes y elevaciones, acceso a rutas importantes y a un uso del suelo ocupado por cultivos de palma aceitera y arroz.

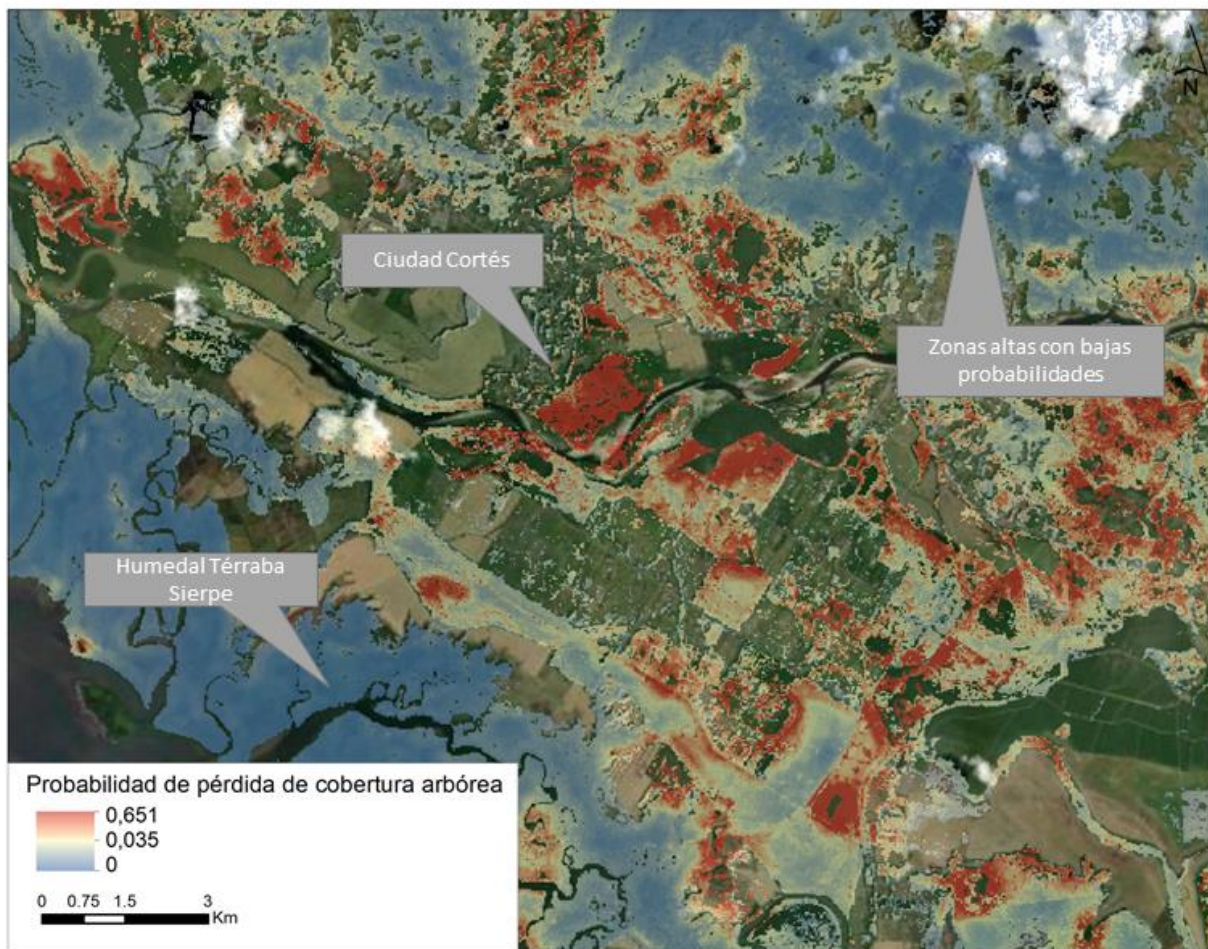
La zona 4 se encuentra a mayor elevación, cerca de los poblados de Colorado de Biolley y Campo Alegre de Potrero Grande. Esta zona tiene cultivos de palma en su cercanía, pero con una menor densidad que las demás zonas. En la zona si existe una fuerte presencia de cultivos de piña y una considerable cantidad de terrenos dedicados a la ganadería.

*Zona Caliente: Ciudad Cortés*

Con el fin de ejemplificar la predicción en detalle se realizó un acercamiento a Ciudad Cortés que se ubica dentro del área con altas probabilidades de pérdida de cobertura arbórea en el sector central oeste de la región Pacífico Sur.

Mapa 8

**Detalle de la probabilidad de pérdida arbórea en la zona caliente: Ciudad Cortés**



Fuente: Elaboración propia con datos de Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID y la Comunidad usuaria SIG, 2021.

En el mapa 8 se puede apreciar Ciudad Cortés, la cual tiene una alta presencia de cultivos de palma y arroz que atraviesan la imagen diagonalmente del extremo superior izquierdo al inferior derecho. Las zonas aledañas tienen una alta probabilidad de pérdida de cobertura arbórea que disminuye conforme se aleja de esas plantaciones.



El humedal Térraba-Sierpe ubicado en el suroeste de la imagen tiene probabilidades menores a perder su cobertura actual, sin embargo, las zonas fronterizas del humedal presentan un mayor riesgo, probablemente producto de la presión que generan las prácticas agrícolas actuales. Las zonas ubicadas al noreste tienen una capacidad de uso de la tierra clase VII<sup>14</sup> la cual limita las prácticas agropecuarias. Es probable que este sea un factor determinante en la reducción de la pérdida arbórea en una zona caracterizada por las plantaciones extensivas.

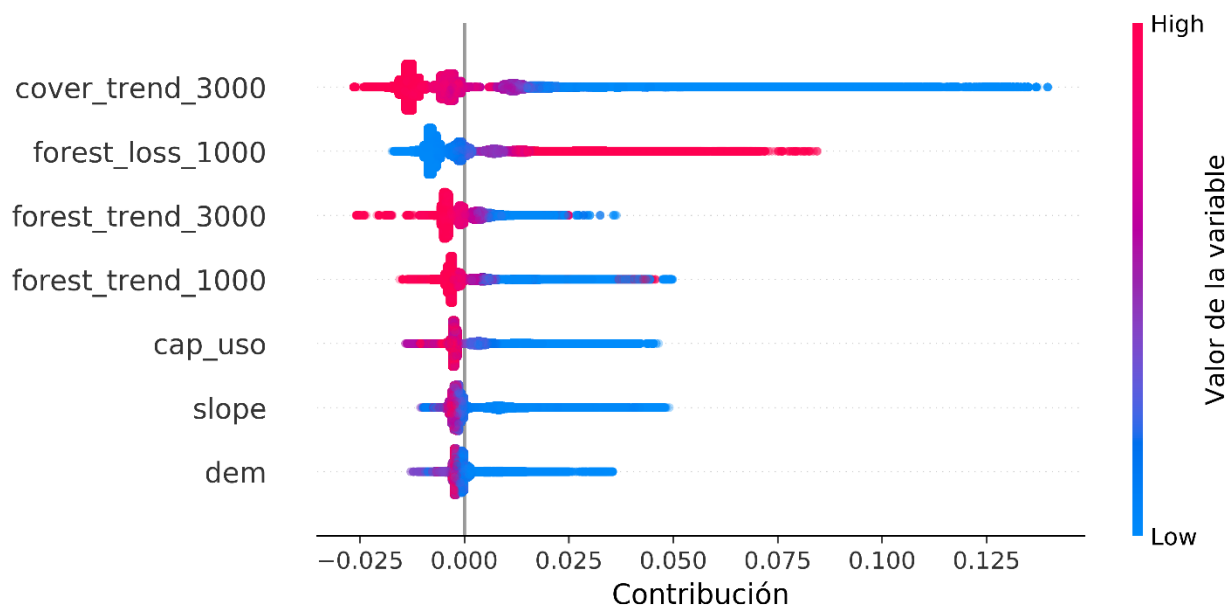
### **Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo**

Si bien la predicción de la pérdida de cobertura arbórea es de gran utilidad puesto que permite cuantificar y localizar la pérdida arbórea para la toma de decisiones, también es relevante cuantificar el aporte relativo de las variables<sup>15</sup> más importantes utilizadas en el modelo. Tal cuantificación permite validar el funcionamiento del modelo y brindar información clara para el entendimiento de los factores que impactan de mayor manera en la predicción de pérdida arbórea.

En el gráfico 8 se visualiza en el eje “x” la contribución marginal de las siete variables con mayor impacto promedio en el modelo. Las contribuciones positivas indican aportes a favor de la pérdida de cobertura arbórea y viceversa. Por otro lado, los valores altos de las variables están coloreados en rosado y los valores bajos en azul. La cantidad de observaciones -áreas de 30 x30m- de cada variable se ve reflejada en la amplitud del eje “y”.

Gráfico 8

### **Contribución de las variables a la predicción en Región Pacífico Sur**



a/ Variables ordenadas en orden descendente según su impacto promedio en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

En esta región, las tres variables con mayores contribuciones son:

1. Tendencia de la pérdida del porcentaje de cobertura arbórea promedio en los últimos cinco años a tres kilómetros alrededor de cada punto de estudio -cover\_trend\_3000-. En general, cuanto más negativa sea la tendencia registrada en su entorno, mayor es la contribución para perder su propia cobertura en el futuro y viceversa.
2. Pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a un kilómetro alrededor de cada punto de estudio -forest\_loss\_1000-. En general, cuanto mayor es la pérdida registrada en su entorno, mayor es la contribución de perder su propia cobertura en el futuro.
3. Tendencia de la cantidad de la cantidad de áreas con cobertura arbórea en los últimos cinco años a tres kilómetros alrededor de cada punto de estudio -forest\_trend\_3000-. En general, cuanto más negativa sea la tendencia registrada en su entorno, mayor es la contribución para perder su propia cobertura en el futuro y viceversa.

Cuatro de las siete variables más importantes corresponden a modificaciones y características de la cobertura del suelo de áreas cercanas al área individual de estudio. Adicionalmente, la figura muestra como las pendientes -slope- y elevaciones -dem- menores aportan a la pérdida de cobertura arbórea y viceversa lo cual es de esperar pues los terrenos planos y bajos son más apetecidos por los desarrollos urbanísticos y agropecuarios. Por último, la variable de capacidad de uso de la tierra -cap\_uso- indica que las áreas con mayores facilidades para el desarrollo agropecuario -capacidad de uso bajo- aportan a la pérdida de cobertura boscosa y viceversa en concordancia con las variables de índole topográficas.

### **Zona Pacífico Norte**

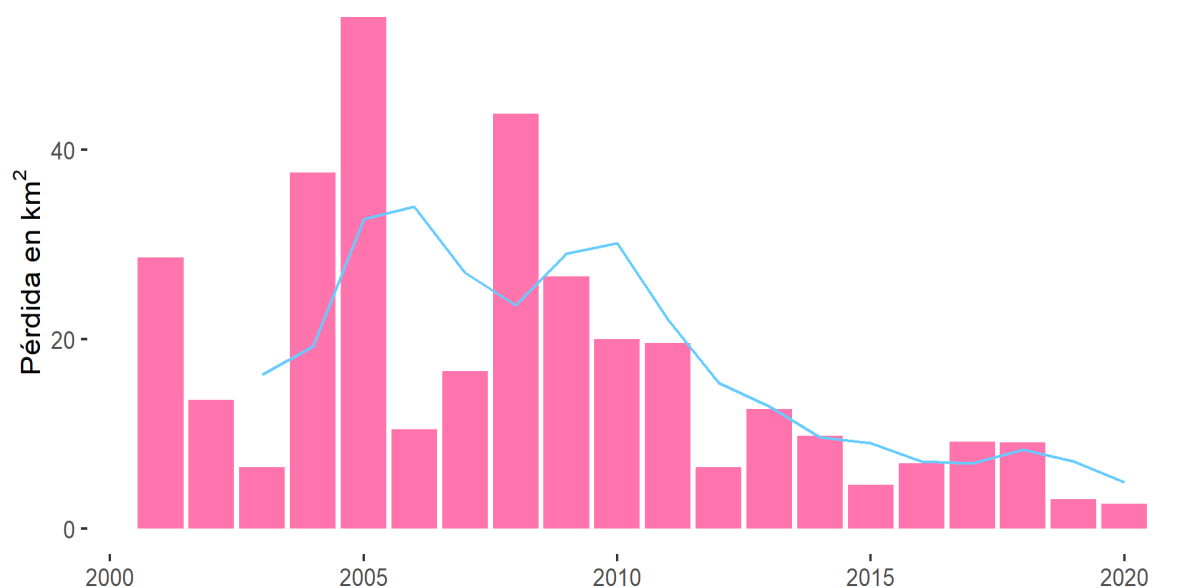
La Zona Pacífico Norte tiene un área de 10.966 km<sup>2</sup> y comprende las cuencas: Península de Nicoya, Tempisque, Bebedero y Abangares. Esta región incluye centros poblacionales como Liberia, Santa Cruz y Nicoya. También alberga importantes sitios de protección como el Parque Nacional Rincón de la Vieja, Palo Verde, Diría y Santa Rosa.

### ***Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020***

De acuerdo con la información del GFC, la región Pacífico Norte poseía un 60,1% -6.592 km<sup>2</sup>- de su territorio con cobertura arbórea en el año 2000. De 2001 a 2020, esta región ha perdido 341 km<sup>2</sup> de tal área-sin considerar ganancias de cobertura arbórea-. Esto equivale a un 5,18% de la cobertura arbórea encontrada en el año 2000 la cual es inferior al porcentaje pérdida nacional - 6,45%-.

Gráfico 9

**Pérdida cobertura arbórea en Pacífico Norte. 2000-2020**



*Media móvil de tres años -rojo- puede representar mejor la tendencia debido a la incertidumbre asociada a comparaciones entre años.*

Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

Tal y como se observa en el gráfico 9 la pérdida de cobertura arbórea tiene una clara tendencia a la baja más notoria que todas las demás regiones. Luego de valores de pérdida alta en la década de los años 2000, la última década muestra un comportamiento estable cerca de los 0 y 10 km<sup>2</sup> anuales.

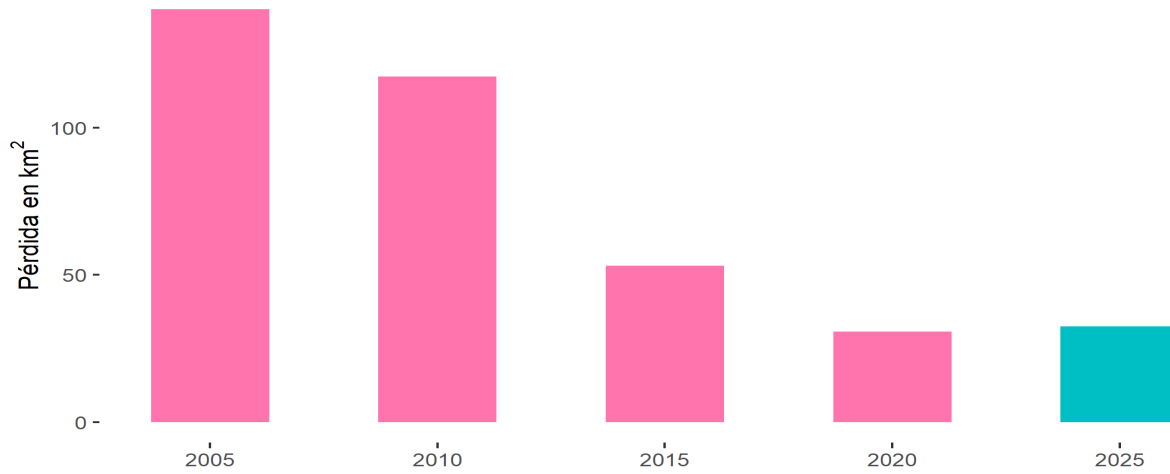
***Pérdida de cobertura arbórea esperada***

De acuerdo con la metodología detallada en los anexos, se espera que entre el año 2021 y 2025 exista una pérdida cobertura arbórea cercana a los 32 km<sup>2</sup>. En términos porcentuales, la región experimentará una disminución del dosel arbóreo de 0,52% la cual es inferior al porcentaje de pérdida nacional y al de todas las regiones analizadas en esta investigación.

A pesar de ser la región que menos contribuye a la pérdida arbórea en términos porcentuales, es la única que presenta un aumento esperado en la pérdida de cobertura arbórea respecto al quinquenio anterior -5,66%-.

Gráfico 10

**Pérdida de cobertura arbórea por quinquenios<sup>a/</sup> en Pacífico Norte**



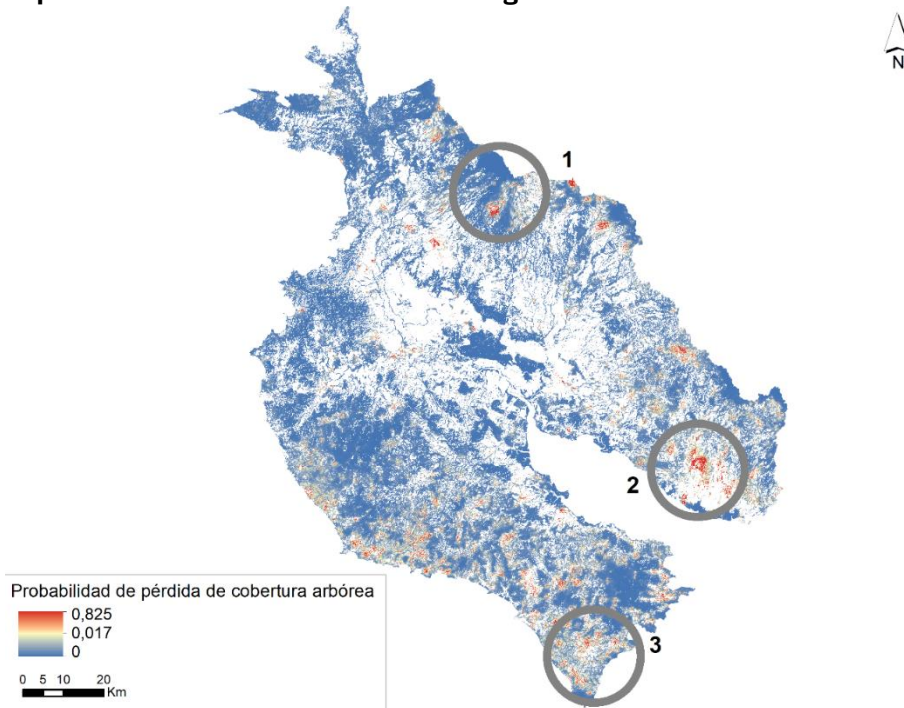
a/ Rosado: Pérdida observada, Celeste: Pérdida esperada  
Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

***Distribución de la predicción***

La probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el horizonte predictivo se distribuye espacialmente según el mapa 9.

Mapa 9

**Probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en la región Pacífico Norte. 2021-2025**



a/ Zonas rojizas indican regiones con una mayor susceptibilidad a perder su cobertura arbórea y las azules una menor disposición.

En la Zona Pacífico Norte destacan áreas con bajas probabilidades de pérdida en zonas como el Parque Nacional 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, la región tiene las áreas con mayores probabilidades de pérdidas de dosel arbóreo dispersas. A continuación, se describirán brevemente las tres zonas delimitadas en el mapa 9 para contar con un panorama general de la zona.

La zona 1 se encuentra en el oeste del distrito de Mogote de Bagaces a unos 11 km al suroeste de Guayabo. Esta zona tiene una amplia cobertura forestal cerca del Parque Nacional Rincón de la Vieja, sin embargo, se aprecia ganadería extensiva y terrenos al descubierto que ejercen presión sobre los bosques de la zona.

La zona 2 se ubica a menos de 10 km del poblado de Sardinal de Puntarenas en dirección suroeste. Esa región se caracteriza por contar con cultivos de caña y piña y terrenos dedicados al pastoreo.

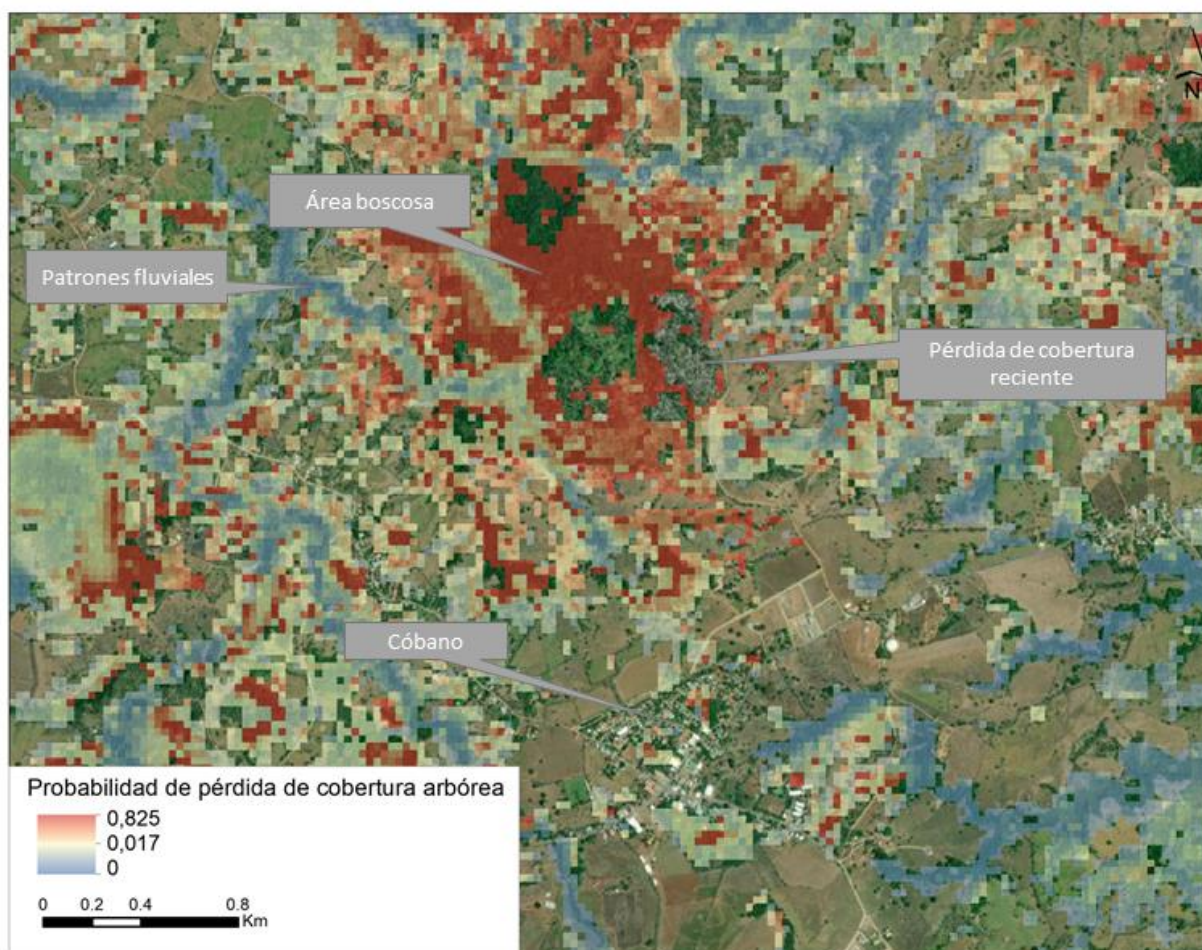
La zona 3 se ubica en la Península de Nicoya e incluye los poblados de Cóbano, El Carmen, Tacotales y Betel. En esta región es común encontrar plantaciones de arroz y teca y vastas áreas dedicadas a la ganadería. Por su atractivo turístico, es común encontrar desarrollos urbanísticos en las cercanías del litoral.

*Zona Caliente: Cóbano de Puntarenas*

Para observar en detalle una de las zonas, se muestra una zona en la Península de Nicoya entre el poblado de Cóbano y Santa Fe.

Mapa 10

**Detalle de la probabilidad de pérdida arbórea en la zona caliente: Ciudad de Cóbano**



Fuente: Elaboración propia con datos de Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID y la Comunidad usuaria SIG, 2021.

En la región central de la imagen se encuentra un área boscosa rodeada de terrenos con usos agropecuarios. Al observar imágenes satelitales recientes<sup>16</sup>, se observan sitios del área boscosa en donde la densidad arbórea es menor. Tales sitios fueron identificados como zonas de pérdida arbórea por el GFC en los últimos dos años. Estas zonas se encuentran en las cercanías de un camino de bajo tránsito y tienen patrones geométricos y por ende podrían asociarse a causas antropogénicas como la tala selectiva. Estos factores sumados a la presencia de terrenos con cobertura no forestal en las cercanías podrían ser los factores que clasifiquen esta zona como riesgosa.

***Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo***

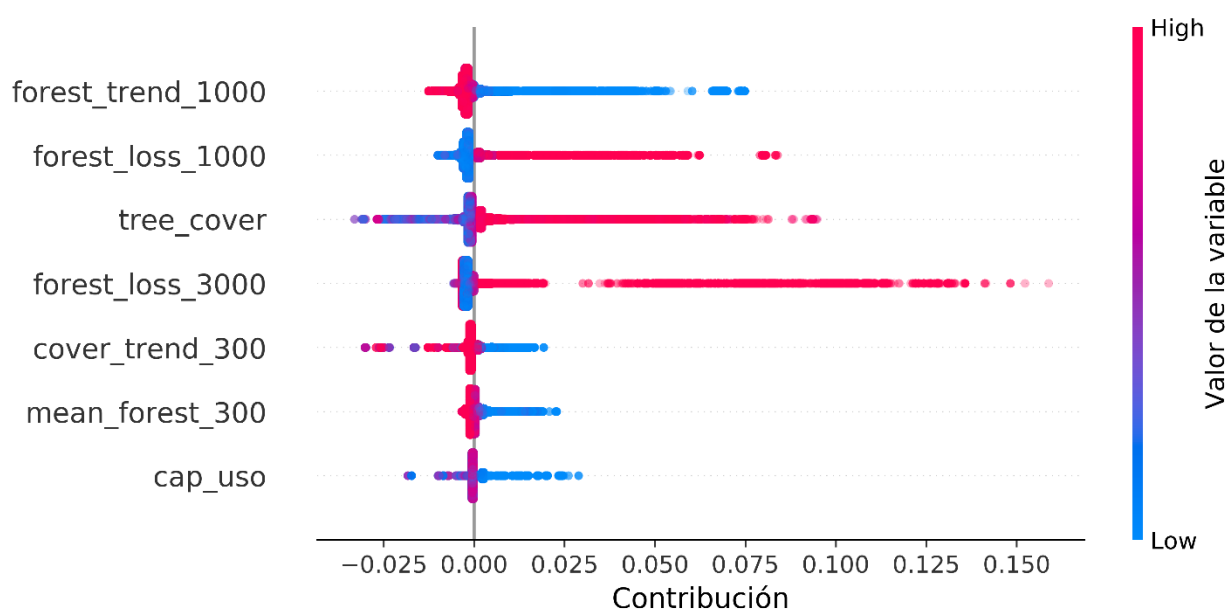
Si bien la predicción de la pérdida de cobertura arbórea es de gran utilidad puesto que permite cuantificar y localizar la pérdida arbórea para la toma de decisiones, también es relevante cuantificar el aporte relativo de las variables<sup>17</sup> más importantes utilizadas en el modelo. Tal cuantificación permite validar el funcionamiento del modelo y brindar información clara para el

entendimiento de los factores que impactan de mayor manera en la predicción de pérdida arbórea.

En el gráfico 11 se visualiza en el eje “x” la contribución marginal de las siete variables con mayor impacto promedio en el modelo. Las contribuciones positivas indican aportes a favor de la pérdida de cobertura arbórea y viceversa. Por otro lado, los valores altos de las variables están coloreados en rosado y los valores bajos en azul. La cantidad de observaciones -áreas de 30 x30m- de cada variable se ve reflejada en la amplitud del eje “y”.

Gráfico 11

**Contribución de las variables<sup>a/</sup> a la predicción en Región Pacífico Norte**



a/ Variables ordenadas en orden descendente según su impacto promedio en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

En esta región, las variables con mayores contribuciones son:

1. Tendencia de la cantidad de la cantidad de áreas con cobertura arbórea en los últimos cinco años a un kilómetro alrededor de cada punto de estudio -forest\_trend\_1000-. En general, cuanto más negativa sea la tendencia registrada en su entorno, mayor es la contribución para perder su propia cobertura en el futuro y viceversa.
2. Pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a un kilómetro alrededor de cada punto de estudio -forest\_loss\_1000-. En general, cuanto mayor es la pérdida registrada en su entorno, mayor es la contribución para perder su propia cobertura en el futuro.
3. Porcentaje de cobertura arbórea registrado en el año 2000 -tree\_cover-, que indica que por lo general las áreas con menor cobertura aportan negativamente a la pérdida de cobertura arbórea y las de mayor cobertura aportan en ambos sentidos dependiendo de los valores de las demás variables.

En este caso, seis de las siete variables más importantes corresponden a modificaciones y características de la cobertura del suelo de áreas cercanas y en el área individual de estudio. Adicionalmente, el gráfico 11 muestra la variable capacidad de uso de la tierra -cap\_uso- que indica que por lo general las áreas con mayores facilidades para el desarrollo agropecuario -capacidad de uso bajo- aportan a la pérdida de cobertura boscosa y viceversa.

## Zona Norte

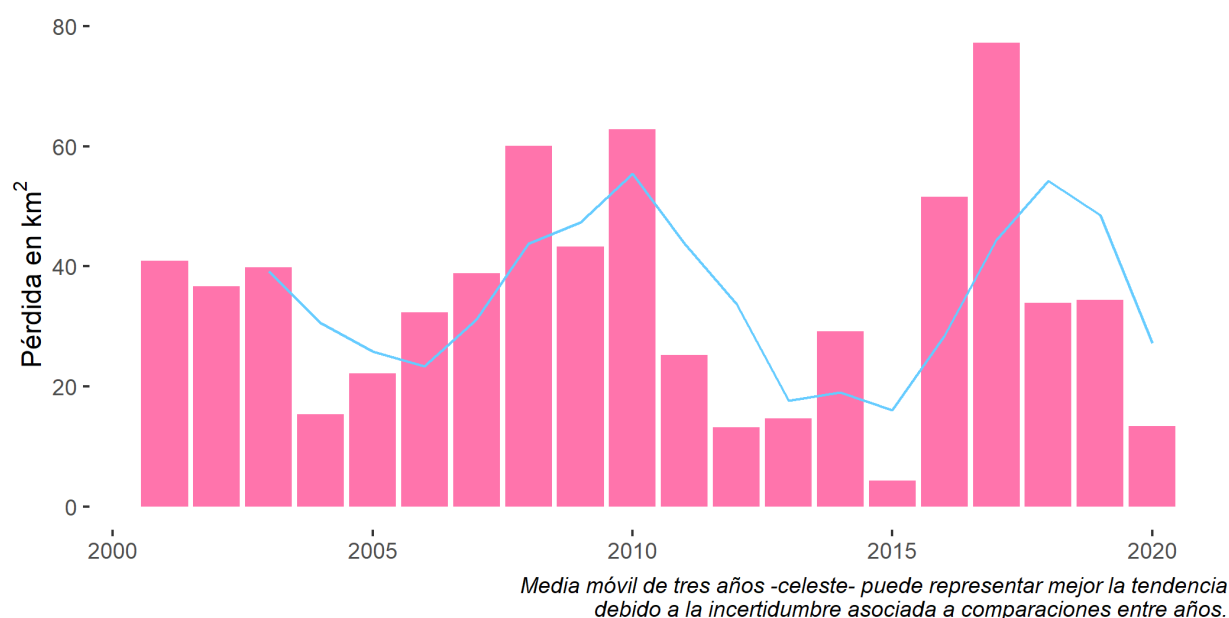
La Zona Norte tiene un área de 10.990 km<sup>2</sup> y comprende las cuencas: Sarapiquí, Cureña, San Carlos, Pocosol, Río Frío y Zapote. Esta región incluye centros poblacionales como Upala, Ciudad Quesada, San Carlos, Puerto Viejo de Sarapiquí y Los Chiles. También alberga importantes sitios de protección como el Parque Nacional Juan Castro Blanco, Braulio Carrillo, Volcán Arenal, Volcán Tenorio, Volcán Miravalles y Monteverde.

### **Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020**

De acuerdo con la información del GFC (Universidad de Maryland y Global Forest Change, 2020), la Zona Norte poseía un 75% -8,241 km<sup>2</sup>- de su territorio con cobertura arbórea en el año 2000. De 2001 a 2020, esta región ha perdido 609 km<sup>2</sup> de tal área-sin considerar ganancias de cobertura arbórea-. Esta pérdida equivale a un 8,37 % de la trama verde encontrada en el año 2000 la cual es superior al porcentaje pérdida nacional -6,45%- y a todas las zonas analizadas en esta investigación.

Gráfico 12

### **Pérdida de cobertura arbórea en Zona Norte. 2000-2020**



Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.



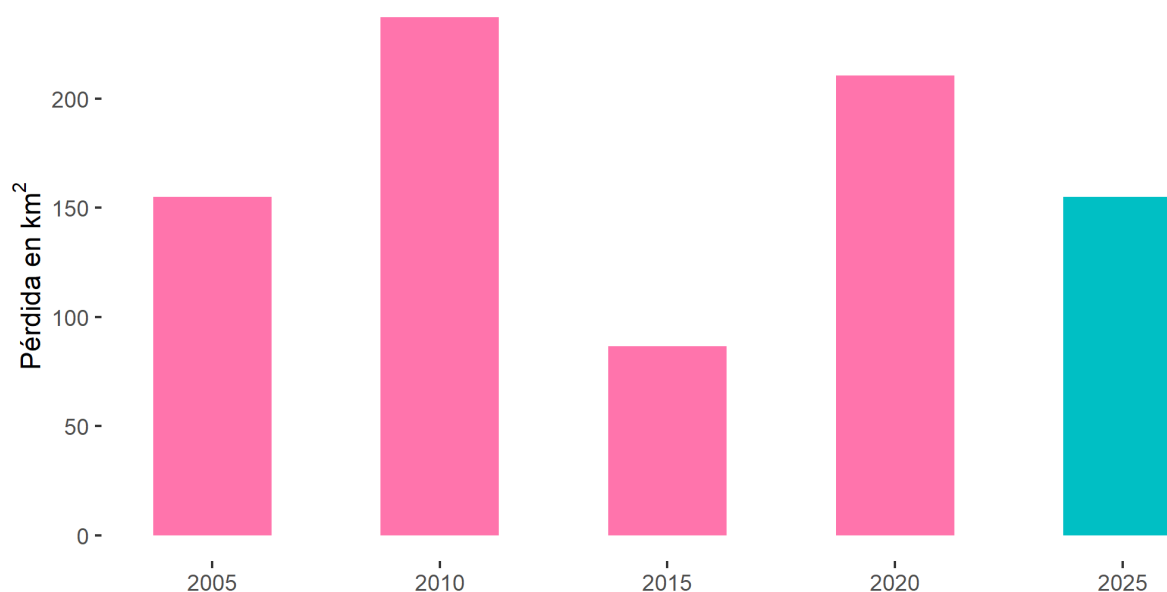
Tal y como se observa en el gráfico 12, la pérdida de cobertura arbórea tuvo una importante variabilidad a lo largo de los años que no representa una tendencia alcista o bajista.

### ***Pérdida cobertura arbórea esperada***

De acuerdo con la metodología detallada en los anexos, se espera que entre el año 2021 y 2025 exista una pérdida de cobertura arbórea de aproximadamente 155 km<sup>2</sup>. En términos porcentuales, la región experimentará una disminución del dosel arbóreo de 2,05% la cual es superior al porcentaje de pérdida nacional y a todas las regiones analizadas en este estudio.

Gráfico 13

### **Pérdida de cobertura arbórea por quinquenios en Zona Norte**



a/ Rosado: Pérdida observada, Celeste: Pérdida esperada.

Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

La predicción muestra un escenario favorable para la región con un decrecimiento de la pérdida de cobertura arbórea del 26,41% respecto al quinquenio anterior y un valor por debajo de la media de los quinquenios registrados.

### ***Distribución de la predicción***

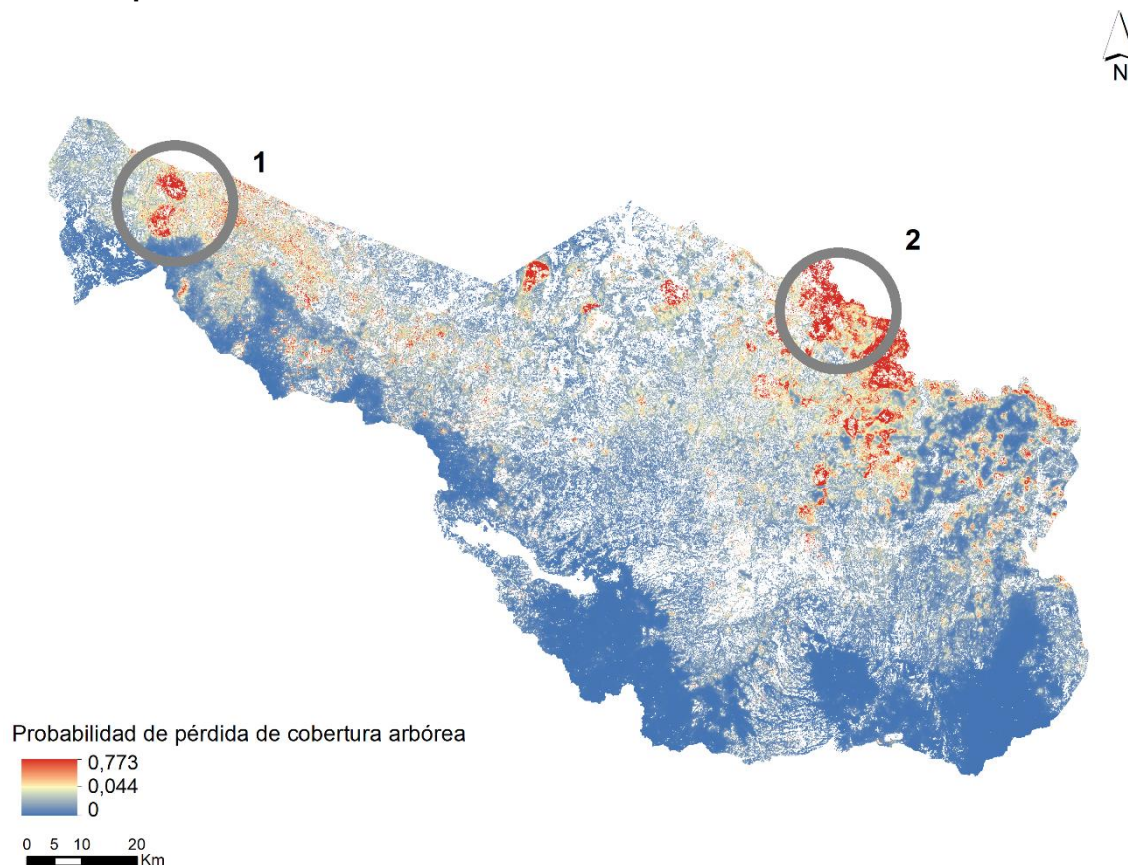
La probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el horizonte predictivo se distribuye espacialmente según se detalla en el mapa 11.

El mapa 11 muestra que la frontera sur de la Zona Norte presenta un riesgo bajo a perder su cobertura arbórea en los próximos 5 años. Esta frontera se caracteriza por encontrarse en áreas protegidas como el Parque Nacional Braulio Carrillo, Juan Castro Blanco y otros asociados a la Cordillera Volcánica de Guanacaste. También tienen elevaciones y pendientes superiores a las

Llanuras del Norte que dificultan desarrollos agrícolas tradicionales. Las zonas en la parte media y norte de la región están asociadas con una mayor pérdida de cobertura arbórea.

Mapa 11

**Probabilidad a perder el dosel arbóreo de la Zona Norte. 2021-2025**



a/ Zonas rojizas indican regiones con una mayor susceptibilidad a perder su cobertura arbórea y las azules una menor disposición.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describirán brevemente las dos zonas calientes delimitadas en el mapa 11 para contar con un panorama general de la zona.

La zona 1 se ubica cerca de los poblados de Santa Cecilia y Santa Elena, también se identifican lugares con riesgo alto en las cercanías de la Ruta Nacional 4 iniciando aproximadamente 8 km al oeste de Santa Cecilia y finalizando cerca de los 7 km al oeste de San José de Upala. Esta zona se caracteriza por el cultivo de naranja y por tener grandes extensiones dedicadas a la ganadería.

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. Esta zona se caracteriza por cultivos de piña, cítricos, frijol y caña de azúcar, ganadería extensiva y actividades relacionadas con la minería.

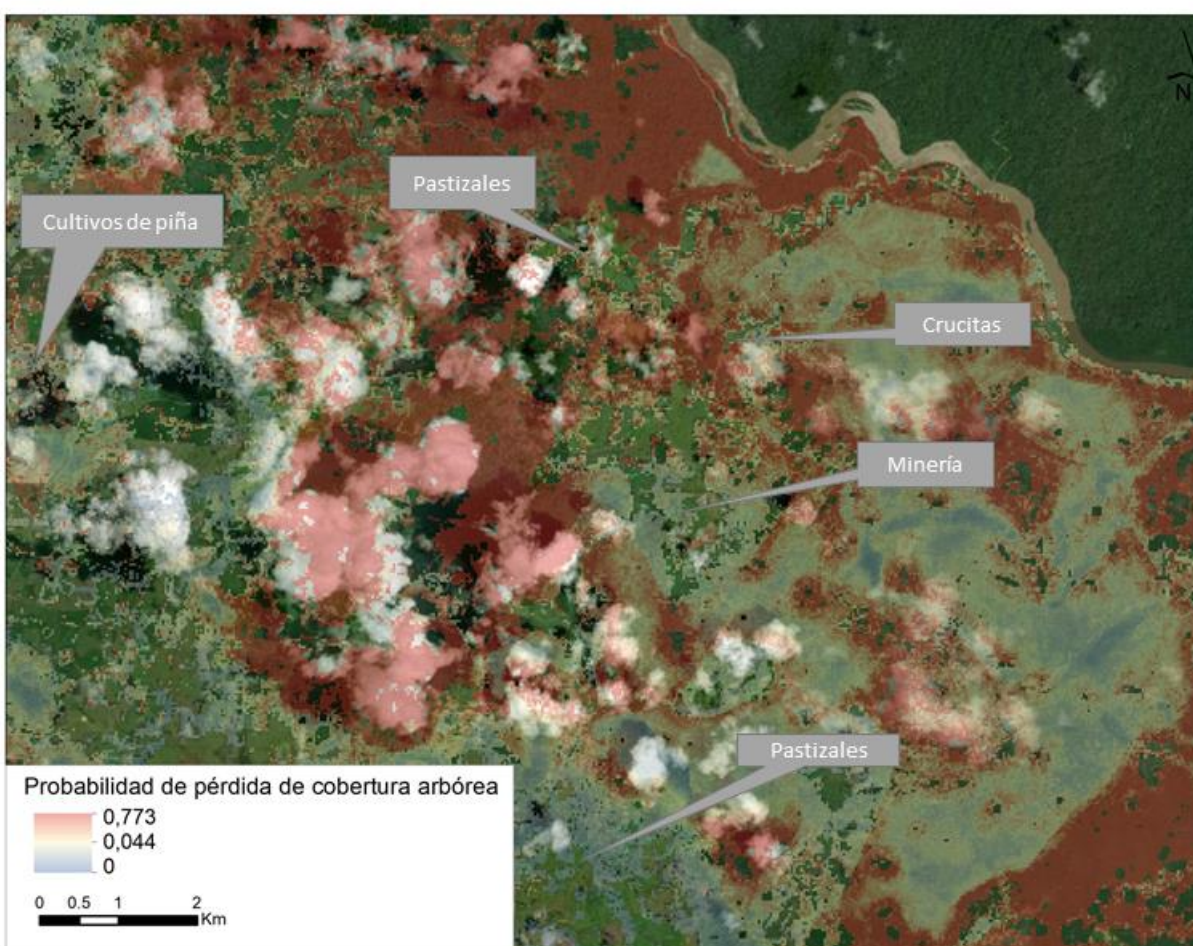
Adicionalmente, las zonas cercanas a la frontera con Nicaragua, al este de la zona 2 tienen un alto riesgo de perder su cobertura arbórea. Tal zona coincide con eventos naturales que afectaron Costa Rica y Nicaragua como el huracán Otto en 2016 y que favorecieron la degradación boscosa.

*Zona Caliente: Llano Verde, Crucitas y Tiricias*

Con el fin de ejemplificar la predicción en detalle se realizó un acercamiento a la ciudad de Llano Verde, Crucitas y Tiricias. Esta zona presenta condiciones naturales y antropogénicas que la hacen susceptible a perder su cobertura arbórea en el próximo quinquenio.

Mapa 12

**Detalle de la probabilidad de pérdida arbórea en las zonas calientes: Llano Verde, Crucitas y Tiricias**



Fuente: Elaboración propia con datos de Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID y la Comunidad usuaria SIG, 2021.

En el mapa 12 se puede apreciar una región rojiza en el centro que indica un alto riesgo a la pérdida de cobertura arbórea. En la región existen factores como la expansión de la frontera piñera en el sector oeste, degradación producto de eventos hidrometeorológicos recientes,

minería en el sector este -Crucitas- y a amplios terrenos dedicados a la ganadería que ejercen presión sobre la cobertura arbórea actual.

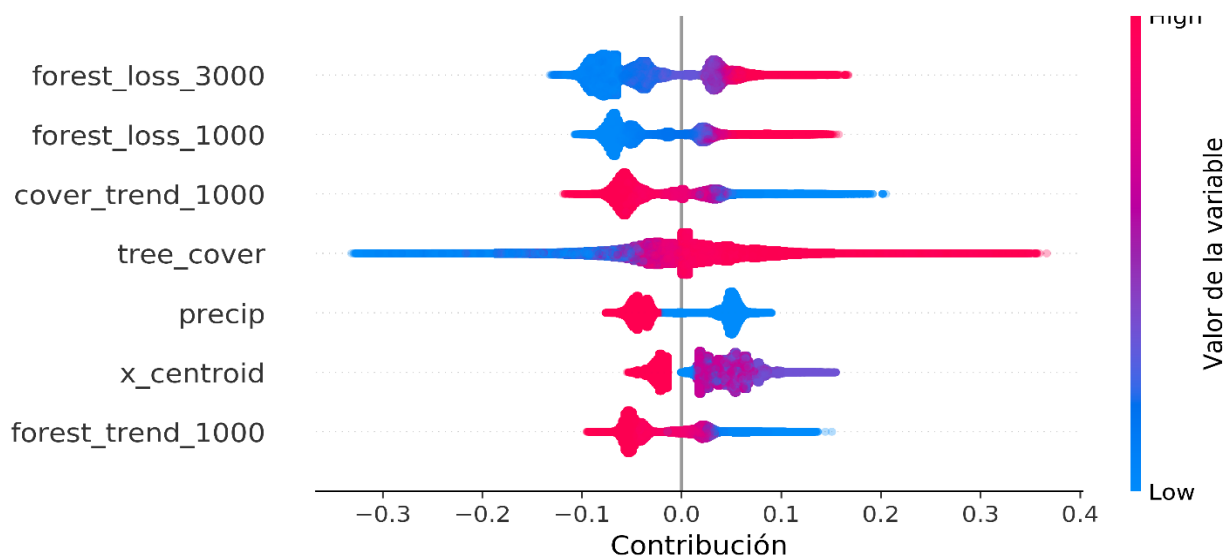
### **Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo**

Si bien la predicción de la pérdida de cobertura arbórea es de gran utilidad puesto que permite cuantificar y localizar la pérdida arbórea para la toma de decisiones, también es relevante cuantificar el aporte relativo de las variables<sup>18</sup> más importantes utilizadas en el modelo. Tal cuantificación permite validar el funcionamiento del modelo y brindar información clara para el entendimiento de los factores que impactan de mayor manera en la predicción de pérdida arbórea.

En el gráfico 14 se visualiza en el eje “x” la contribución marginal de las siete variables con mayor impacto promedio en el modelo. Las contribuciones positivas indican aportes a favor de la pérdida de cobertura arbórea y viceversa. Por otro lado, los valores altos de las variables están coloreados en rosado y los valores bajos en azul. La cantidad de observaciones -áreas de 30 x30m- de cada variable se ve reflejada en la amplitud del eje “y”.

Gráfico 14

### **Contribución de las variables<sup>a/</sup> a la predicción en Zona Norte**



a/ Variables ordenadas en orden descendente según su impacto promedio en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

En esta región, las variables con mayores contribuciones son:

1. Pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a tres kilómetros alrededor de cada punto de estudio -forest\_loss\_3000-. En general, cuanto mayor es la pérdida registrada en su entorno, mayor es la contribución de perder su propia cobertura en el futuro.

2. Pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a un kilómetro alrededor de cada punto de estudio -forest\_loss\_1000-. En general, cuanto mayor es la pérdida registrada en su entorno, mayor es la contribución de perder su propia cobertura en el futuro.
3. Tendencia de la pérdida del porcentaje de cobertura arbórea promedio en los últimos cinco años a un kilómetro alrededor de cada punto de estudio -cover\_trend\_1000-. En general, cuanto más negativa sea la tendencia registrada en su entorno, mayor es la contribución para perder su propia cobertura en el futuro y viceversa.

En esta zona, cinco de las siete variables más importantes corresponden a modificaciones y características de la cobertura del suelo de áreas cercanas y en el área individual de estudio. Adicionalmente, la precipitación promedio anual-precip-, definida en las zonas de vida, es un elemento importante para la predicción. En esta región, las mayores precipitaciones se concentran en los bosques muy húmedos tropicales, bosques pluviales ubicados principalmente en la frontera sur y este. La ubicación geográfica -x\_centroid- indica que por lo general áreas ubicadas al este contribuyen a favor de la conservación.

## **Zona Caribe**

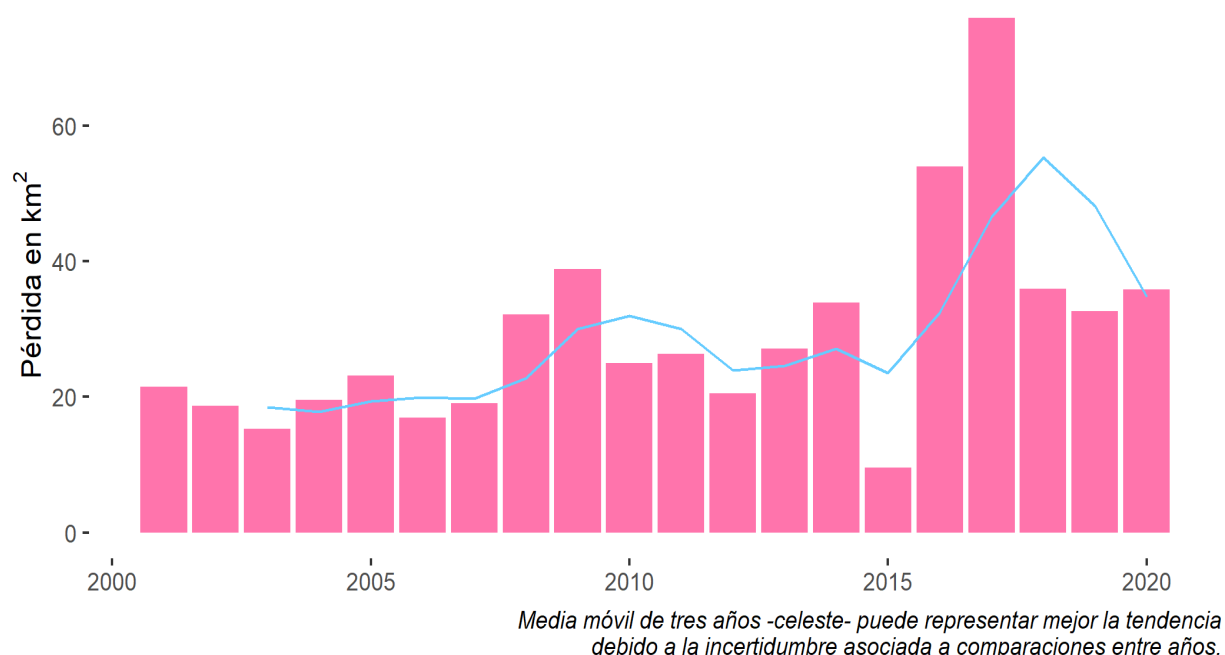
La Zona Caribe tiene un área de 13.003 km<sup>2</sup> y comprende las cuencas Sixaola, Estrella, Banano, Bananito, Moín, Matina, Madre de Dios, Pacuare, Reventazón, Tortuguero, Chirripó. Esta región incluye centros poblacionales como Limón, Guácimo, Guápiles y Matina. También alberga importantes sitios de protección como Tortuguero, La Amistad, Tapantí-Macizo de la Muerte y Braulio Carrillo.

### ***Pérdida de cobertura arbórea 2000-2020***

De acuerdo con la información del GFC, la región Caribe poseía un 88,4% -11.494 km<sup>2</sup>- de su territorio con cobertura arbórea en el año 2000. De 2001 a 2020, esta región ha perdido 582 km<sup>2</sup> de tal área-sin considerar ganancias de cobertura arbórea-. Esta pérdida equivale a un 5,06 % del dosel arbóreo encontrado en el año 2000 la cual es inferior al porcentaje pérdida nacional -6,45%- y a todas las unidades hidrológicas analizadas en esta investigación.

Gráfico 15

**Pérdida de cobertura arbórea en Zona Norte. 2000-2020**



Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

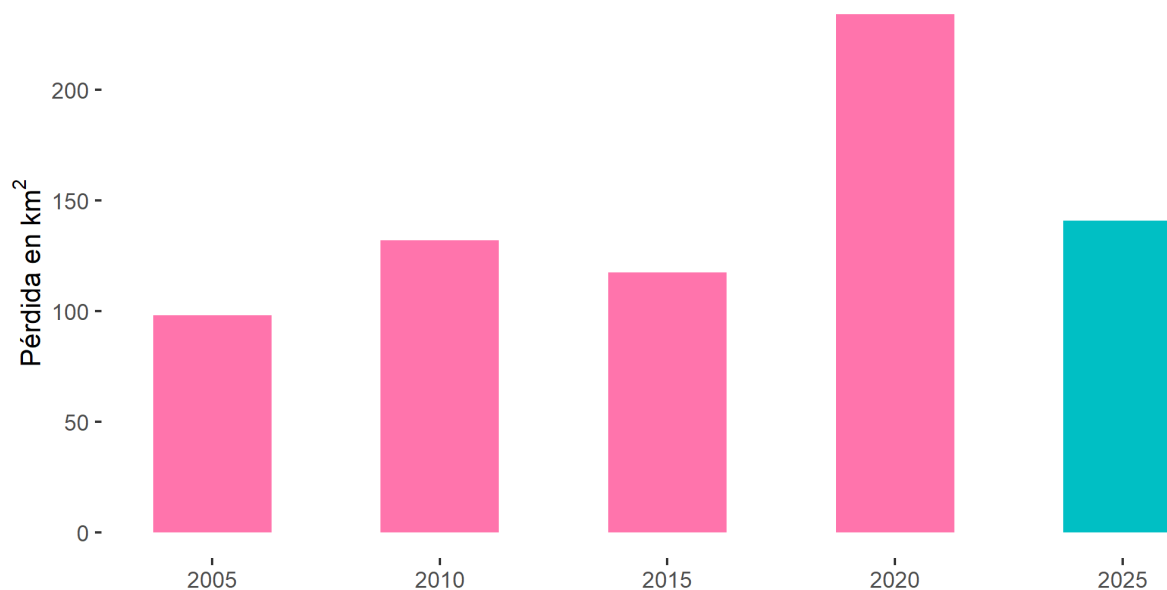
Tal y como se observa en el gráfico 15, la pérdida de cobertura arbórea tiene una tendencia al alza producto de un crecimiento en el último quinquenio. En comparación con las otras regiones, la Zona Caribe es la que presenta un mayor incremento relativo en los últimos años.

***Pérdida de cobertura arbórea esperada***

De acuerdo con la metodología detallada en los anexos, se espera que entre el año 2021 y 2025 ocurra una pérdida cobertura arbórea cercana a los 141 km<sup>2</sup>. En términos porcentuales, la región experimentará una disminución del dosel arbóreo de 1,29% la cual es inferior al promedio nacional -1,40%-.

Gráfico 16

**Pérdida de cobertura arbórea por quinquenios observada y esperada<sup>a/</sup> en la Zona Caribe**



a/ Rosado: Pérdida observada, Celeste: Pérdida esperada.

Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

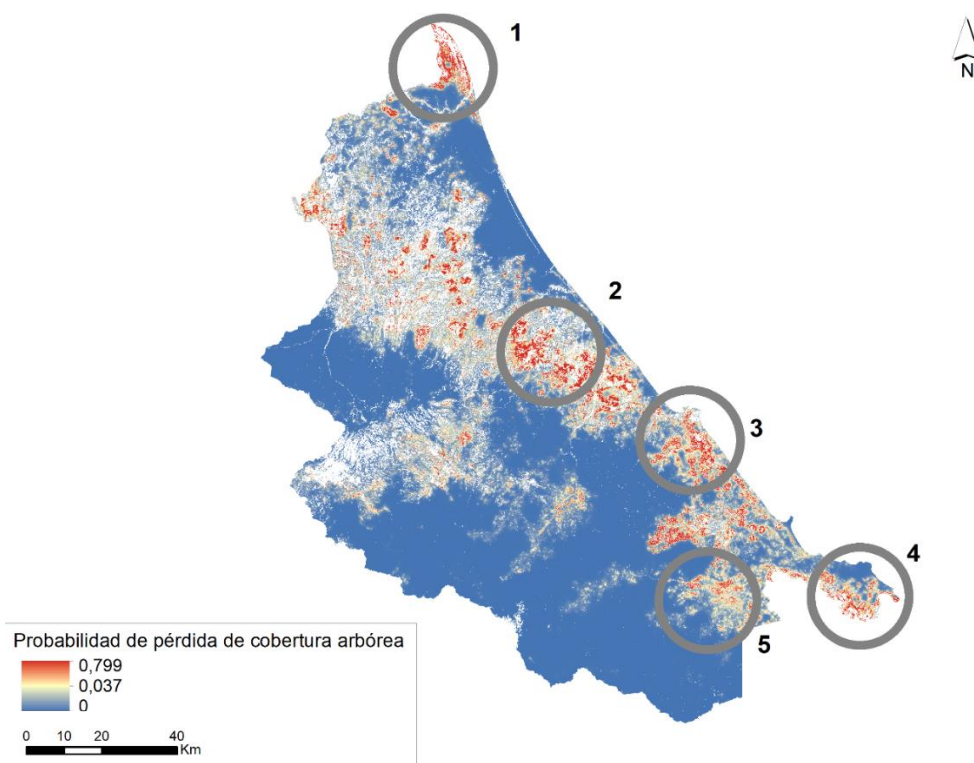
La predicción muestra un escenario favorable para la región respecto al quinquenio anterior con un decrecimiento de la pérdida cobertura arbórea del 39,8% en relación con el período pasado. Sin embargo, si se consideran las pérdidas de todos los períodos, la región sigue presentando una tendencia al alza.

***Distribución de la predicción***

La probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en el horizonte predictivo se distribuye espacialmente según se detalla en el mapa 13.

Mapa 13

**Probabilidad de pérdida de cobertura arbórea de la región Caribe<sup>a/</sup>. 2021-2025**



a/ Zonas rojizas indican regiones con una mayor susceptibilidad a perder su cobertura arbórea y las azules una menor disposición.

La región Caribe muestra sectores claramente definidos que tienen un bajo riesgo a perder su cobertura arbórea en los próximos 5 años. Estas zonas se encuentran en gran parte en zonas protegidas como el Parque Internacional La Amistad, el Parque Nacional Braulio Carrillo, Chirripó, Tapantí-Macizo de la Muerte y Tortuguero. A lo largo de la región se delimitaron cinco zonas calientes que describen de manera general el panorama de la región.

En el extremo norte, la zona 1 se concentra en la Isla Calero la cual, de acuerdo con GFC, los últimos cinco años ha sufrido pérdida de cobertura arbórea en alrededor de 32 km<sup>2</sup>. Inspección de fotografías satelitales<sup>19</sup> muestran terrenos dedicados a la ganadería y tala de árboles en vastas extensiones aledañas al río San Juan y otras pérdidas relacionadas con eventos naturales y sus condiciones fluviográficas.

La zona 2 se localiza en las cercanías de Matina, Batán y Venecia las cuales son zonas con una alta densidad de plantaciones bananeras. Tal zona tiene una capacidad del uso del suelo Clase I y II que favorecen las actividades agropecuarias que se concentran a menos de 5 km a ambos lados de la Ruta 32.

La zona 3 es un área delimitada aproximadamente por la línea del ferrocarril y la Ruta 36. Tal área inicia cerca de la ciudad de Limón y continúa por Ruta 36 a lo largo de la costa hasta



aproximadamente 4 km de Cahuita. En tal región, se ubican los poblados de La Bomba, Beverly, Bananito Sur, San Andrés, San Clemente y Bonificio. Esta zona se caracteriza por ubicarse a menos de 5 km del litoral, ser accesible por medios terrestres y el cultivo intensivo de banano.

En las cercanías de la ciudad de Sixaola se localiza la zona 4. Esta región se caracteriza por una agricultura extensiva de banano y plátano que bordea el margen izquierdo del río Sixaola. En donde los principales cultivos se ubican a más de 4 km del litoral Caribe.

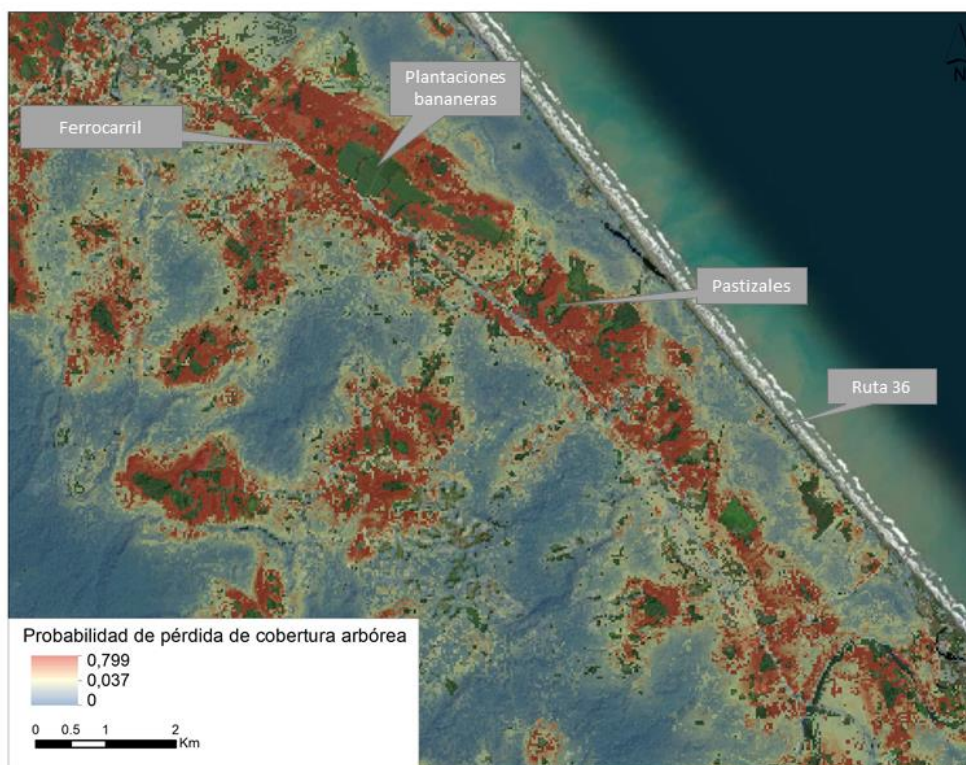
Por último, la zona 5 se localiza en la cuenca baja del río Telire cerca de las comunidades de Shiroles y Amubri. Esta zona tiene pendientes inferiores al 5% y alturas inferiores a los 250 msnm. Los terrenos están dedicados a la agricultura y la ganadería y tiene un fraccionamiento mayor que los de las zonas 2, 3 y 4. Todas las zonas se caracterizan por tener bajas elevaciones y bajas pendientes. Las zonas 2, 3, 4 y 5 tienen una capacidad de uso de la tierra que favorece el desarrollo agropecuario que coincide con su cobertura y ejerce presión sobre las coberturas arbóreas actuales.

#### *Zona caliente: San Andrés del Valle de la Estrella*

Para ejemplificar, se muestra la Zona 3 que está ubicada cerca de la costa Caribe, al sur de la ciudad de Limón. Esta región cuenta con cultivos intensivos de banano y áreas dedicadas al pastoreo que ejercen presión sobre las áreas con cobertura arbórea aledañas.

Mapa 14

#### **Detalle de la probabilidad de pérdida arbórea en la zona caliente: San Andrés**



Fuente: Elaboración propia con datos de Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID y la Comunidad usuaria SIG, 2021.

En el mapa 14 se observa como las zonas con mayor riesgo a perder su cobertura arbórea se ubican cerca de los alrededores de la ruta del ferrocarril, principalmente en el extremo derecho en el sentido sur-norte.

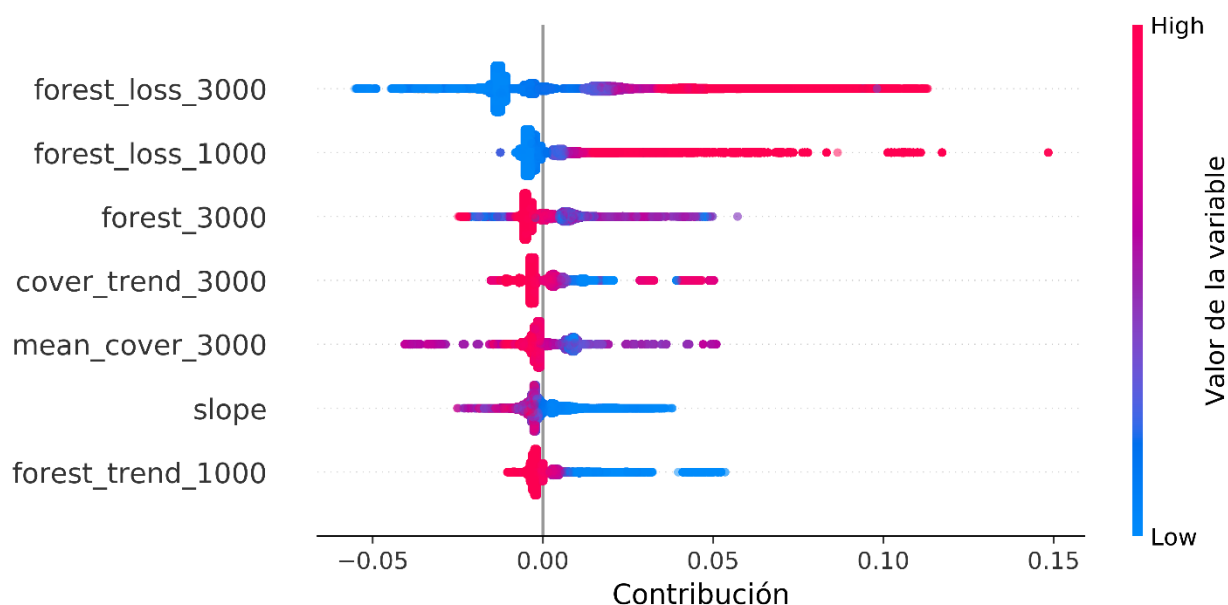
### **Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo**

Si bien la predicción de la pérdida de cobertura arbórea es de gran utilidad puesto que permite cuantificar y localizar la pérdida arbórea para la toma de decisiones, también es relevante cuantificar el aporte relativo de las variables<sup>20</sup> más importantes utilizadas en el modelo. Tal cuantificación permite validar el funcionamiento del modelo y brindar información clara para el entendimiento de los factores que impactan de mayor manera en la predicción de pérdida arbórea.

En el gráfico 17 siguiente se visualiza en el eje “x” la contribución marginal de las siete variables con mayor impacto promedio en el modelo. Las contribuciones positivas indican aportes a favor de la pérdida de cobertura arbórea y viceversa. Por otro lado, los valores altos de las variables están coloreados en rosado y los valores bajos en azul. La cantidad de observaciones -áreas de 30 x30m- de cada variable se ve reflejada en la amplitud del eje “y”.

Gráfico 17

### **Contribución de las variables a la predicción en Zona Caribe**



a/ Contribuciones positivas aportan a las probabilidades de perder cobertura arbórea y viceversa. Variables ordenadas en orden descendente según su impacto promedio en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

En esta región, las variables con mayores contribuciones son:

1. Pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a tres kilómetros alrededor de cada punto de estudio -forest\_loss\_3000-. En general, cuanto mayor es la pérdida registrada en su entorno, mayor es la contribución a de perder su propia cobertura en el futuro.
2. Pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a un kilómetro alrededor de cada punto de estudio -forest\_loss\_1000-. En general, cuanto mayor es la pérdida registrada en su entorno, mayor es la contribución a de perder su propia cobertura en el futuro.
3. Cantidad de áreas con cobertura arbórea en los últimos 5 años a tres kilómetros de cada punto de estudio - forest\_3000-. En general, cuanto mayor es la cantidad de áreas con cobertura arbórea en su entorno, menor es la probabilidad de perder su propia cobertura.

En este caso seis de las siete variables más importantes corresponden a modificaciones y características de la cobertura del suelo de áreas cercanas y en el área individual de estudio. Adicional a este tipo de variables se encuentra la variable pendiente -slope- que indica que las pendientes elevadas aportan a la conservación y viceversa.

## Resumen

La pérdida de cobertura arbórea esperada en el país y la mayoría de las regiones será decreciente respecto a la ocurrida en el periodo 2016-2020. En ese sentido se espera que en el periodo 2021-2025, el país avance en cuanto a la protección de su cobertura arbórea y mantenga magnitudes de pérdida de dosel arbóreo inferiores a los valores promedio de Costa Rica y la región Centroamericana.

A nivel regional se espera que las pérdidas porcentuales más importantes ocurran en la Zona Norte y en Pacífico Sur y por ende deberían ser prioritarias al momento de definir políticas públicas e implementar acciones de conservación. Estas zonas se caracterizan por ser predominantemente rurales, concentrar la mayor cantidad de cultivos de piña, banano y palma aceitera y coinciden con las regiones que han perdido la mayor cantidad de dosel arbóreo en los últimos 20 años.

La zona con la pérdida porcentual más baja es la región Pacífico Norte. Esta región tiene la característica de que las zonas con probabilidades altas de pérdida de dosel arbóreo se encuentran dispersas en el paisaje y por ende presentan un reto a la hora de definir acciones de protección. A pesar de ser la región con la menor pérdida porcentual es interesante notar que también es la única con una variación en la pérdida por quinquenio positiva. En otras palabras, aunque se espere un incremento en la pérdida respecto al quinquenio anterior, la pérdida relativa sigue siendo baja en comparación con las otras regiones.

Cuadro 2

### Valores esperados de pérdida de cobertura arbórea

| Zona       | Pérdida 2016-2020 (km <sup>2</sup> ) | Pérdida esperada 2021-2025 (km <sup>2</sup> ) | Variación (%) | Pérdida esperada/cobertura al 2020 (%) |
|------------|--------------------------------------|---|---------------|--|
| Zona Norte | 210,52                               | 154,92  | -26,41        | 2,05                                   |

|                         |        |        |        |      |
|-------------------------|--------|--------|--------|------|
| <b>Pacífico Sur</b>     | 149,50 | 138,13 | -7,61  | 1,75 |
| <b>Zona Caribe</b>      | 234,30 | 140,93 | -39,85 | 1,29 |
| <b>Pacífico Central</b> | 55,55  | 48,24  | -13,17 | 1,19 |
| <b>Pacífico Norte</b>   | 30,69  | 32,42  | 5,66   | 0,52 |
| <b>Costa Rica</b>       | 680,56 | 514,64 | -24,38 | 1,40 |

Fuente: Elaboración propia.

### **Características generales de las zonas propensas a perder su cobertura arbórea en los próximos cinco años**

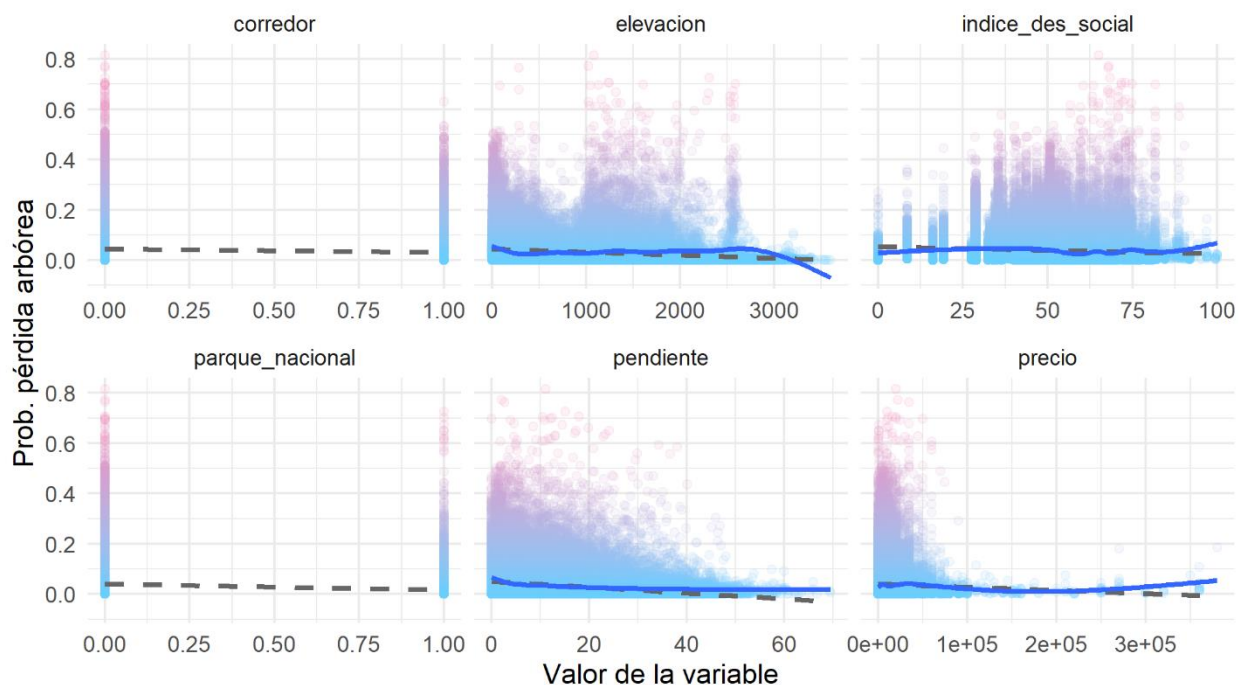
En los apartados anteriores se describieron las variables que mayores contribuciones<sup>21</sup> aportan a la predicción del modelo de aprendizaje automático. Por las variables utilizadas y la metodología seguida, las variables más importantes son aquellas que describen el comportamiento y características de la cobertura arbórea en las cercanías de cada unidad de estudio.

Las variables de mayor peso en 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, con excepción de la Zona Pacífica Norte y Pacífico Central, en las cuales los efectos a un kilómetro son más relevantes. En el Pacífico Central, Pacífico Norte y el Caribe es relevante no solamente la pérdida observada si no también la cantidad (áreas con cobertura arbórea en las cercanías) y calidad (porcentaje de cobertura arbórea de las áreas con cobertura en las cercanías) de áreas con cobertura arbórea en las cercanías del punto en análisis. Factores topográficos, como la pendiente y la elevación, están entre las siete variables con mayores contribuciones en el Pacífico Central, Pacífico Sur y Caribe. En general, una mayor pendiente y elevación aportan positivamente a la conservación del dosel arbóreo. En el Pacífico Sur y Norte, la capacidad de uso del suelo es relevante e indica un aporte positivo a la conservación de la cobertura en aquellas áreas con limitaciones para el desarrollo de prácticas agropecuarias. Finalmente, tres variables aisladas están presentes entre las siete con mayores contribuciones: distancia a ríos, ubicación longitudinal y precipitación anual asociada a la zona de vida.

Empleando un enfoque bivariado y a partir de las predicciones obtenidas<sup>22</sup>, se graficó la distribución de variables que fueron utilizadas en el modelo y otras adicionales que no fueron utilizadas debido a limitaciones temporales en la información. Al analizar estas distribuciones es posible caracterizar y diferenciar las zonas según la probabilidad de perder su cobertura arbórea contra alguna variable específica. En las imágenes siguientes se presenta en un gris punteado la recta de mejor ajuste que permite identificar asociaciones lineales y en azul una curva suavizada para mostrar patrones no lineales.

Gráficos 17

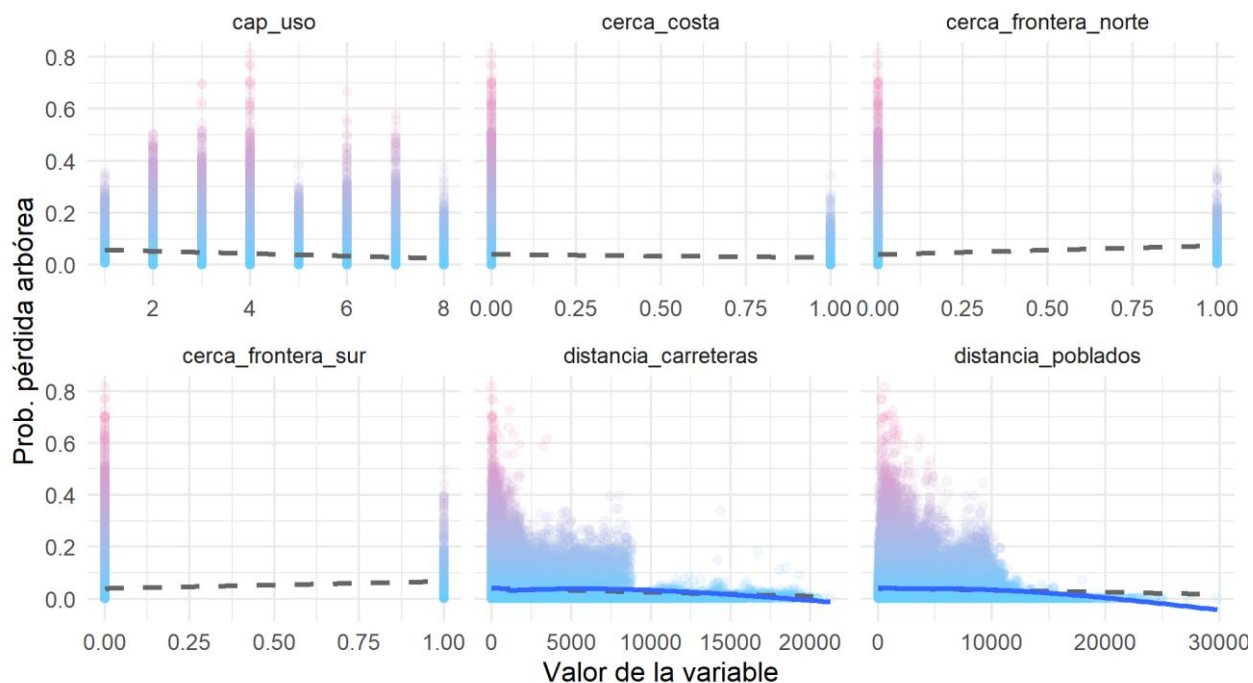
**Distribución de variables respecto a la probabilidad de pérdida futura I<sup>23</sup>**



Fuente: Elaboración propia.

Gráficos 18

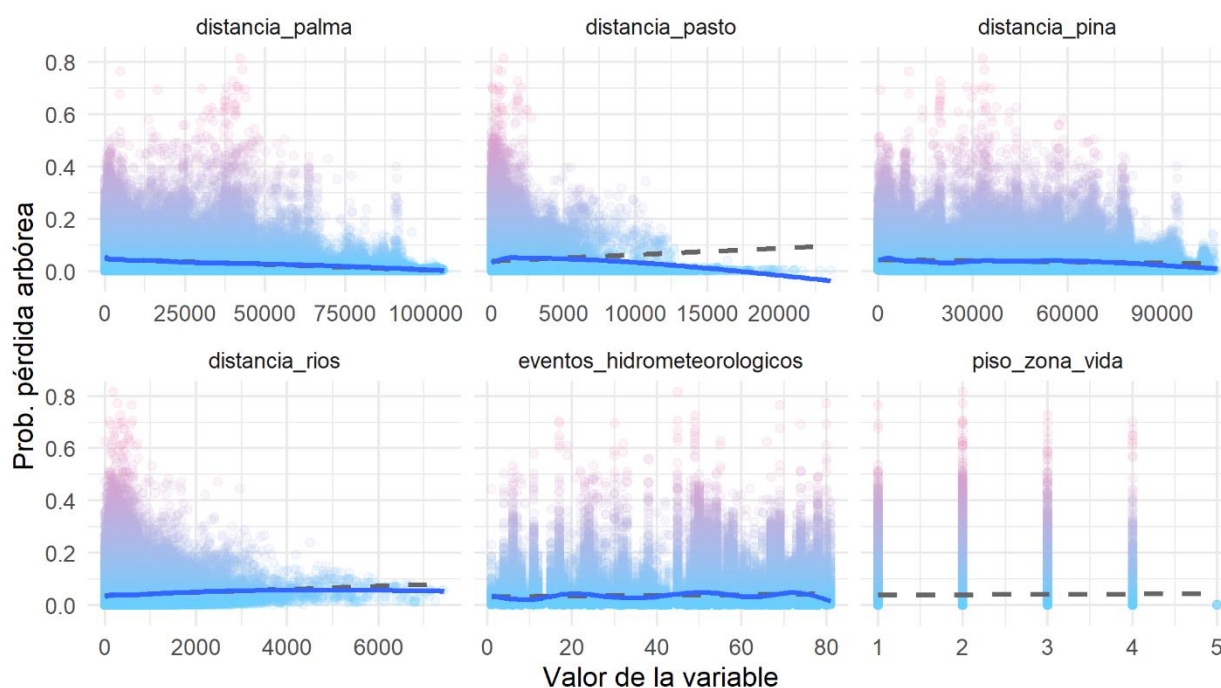
**Distribución de variables respecto a la probabilidad de pérdida futura II<sup>24</sup>**



Fuente: Elaboración propia.

Gráficos 19

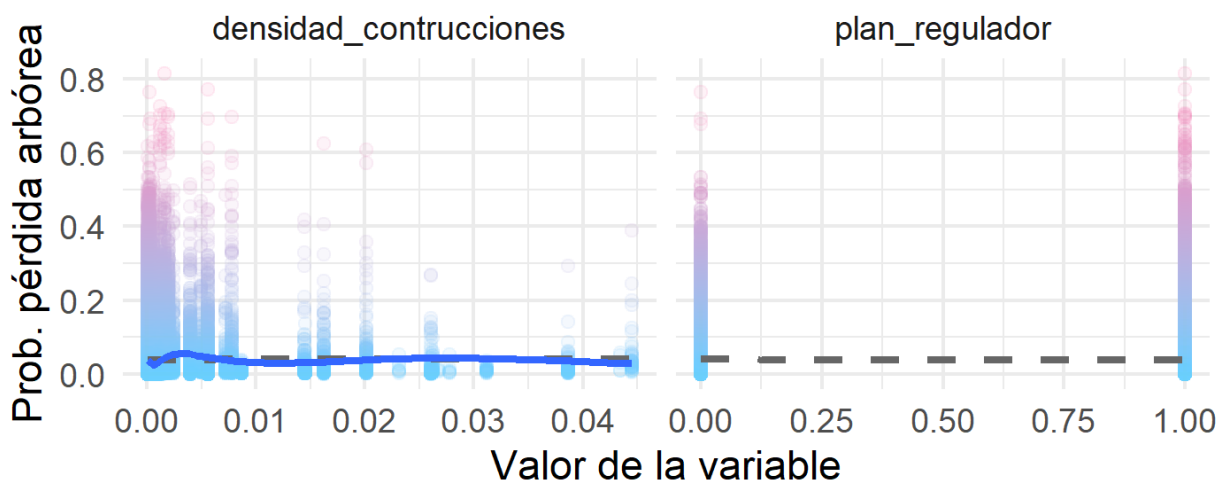
**Distribución de variables respecto a la probabilidad de pérdida futura III**



Fuente: Elaboración propia.

Gráficos 20

**Distribución de variables respecto a la probabilidad de pérdida futura IV**



Fuente: Elaboración propia.

Con base en el análisis de los gráficos anteriores se puede concluir lo siguiente<sup>25</sup>:

- Aquellas áreas que se encuentran dentro de un parque nacional o un corredor biológico están asociadas a una probabilidad de conservar su cobertura actual que las áreas fuera de ellos.
- Pendientes y elevaciones mayores están asociadas a la conservación de la cobertura arbórea y viceversa.
- Los distritos con un mayor índice de desarrollo social<sup>26</sup> están asociados a una menor probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.
- En general, el precio bajo de un terreno está asociado con la pérdida de cobertura arbórea.
- Las clases de capacidad de uso de la tierra que son favorables para el desarrollo agropecuario están asociadas a una probabilidad mayor de perder su cobertura arbórea y viceversa.
- Áreas a una distancia menor a 500 m de una frontera internacional está asociada a una mayor probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.
- Las áreas cercanas a la costa están asociadas a una menor probabilidad de perder su cobertura arbórea.
- Las áreas en las cercanías de las carreteras<sup>27</sup> y poblados<sup>28</sup> están asociados a una mayor probabilidad de perder su cobertura arbórea en el futuro.
- La cercanía a los cultivos de piña y palma -únicos cultivos analizados- está asociada a una pérdida de cobertura arbórea, es decir, cuánto más lejos esté un área de esta frontera agrícola, menor es la probabilidad de perder su cobertura actual.
- Si bien hay una relación lineal positiva entre la distancia a pastos y la probabilidad de pérdida, es evidente que existe una concentración de altas probabilidades de pérdida para aquellas áreas ubicadas a menos de 2,5 kilómetros de pasturas en relación con otros más alejados la cual se ve reflejado en la curva de mejor ajuste azul.
- Existe una asociación positiva entre la distancia a los ríos y la probabilidad a perder su cobertura arbórea. Las áreas a menos de 50 m (incluye zonas de protección) de los cauces tienen en promedio menores probabilidades de perder su cobertura que aquellas más alejadas.
- Los pisos más altos de las zonas de vida<sup>29</sup> están asociados a una menor probabilidad de pérdida, consecuentemente los pisos más bajos ubicados en las partes bajas del paisaje están relacionados con una mayor pérdida de cobertura arbórea.
- El cumplimiento de un plan regulador<sup>30</sup> está asociado levemente a una probabilidad mayor a perder la cobertura arbórea en relación con aquellos cantones que no cuentan con un plan regulador.
- Los cantones que tienen una mayor cantidad de eventos hidrometeorológicos están asociados a una mayor probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.

A nivel general, se puede concluir que las zonas con una mayor presión a perder su cobertura arbórea para el 2025 se caracterizan por ubicarse en zonas en donde la tierra tiene características que la hacen apta para desarrollar otras actividades agropecuarias tales como la capacidad de uso, pendientes bajas y cercanía de otros cultivos como la piña, palma y pasto. Este hallazgo concuerda con lo identificado por Sierra et al (2016) en el cual se señala que el mayor factor directo en el cambio de cobertura forestal en Costa Rica es el pastoreo y la agricultura (durante su periodo de estudio: 1987 -2013). Estas zonas también se encuentran en

regiones con terrenos con precios más bajos, más accesibles por vías terrestres y tienden a tener un índice de desarrollo<sup>31</sup> más bajo que los otros distritos.

En contraposición, las áreas que se encuentran dentro de áreas protegidas, corredores biológicos, en las zonas protegidas de ríos y zonas costeras están asociadas a una conservación de su cobertura actual. Tal caracterización demuestra una asociación positiva en concordancia con estudios pasados (Robalino & Villalobos, 2014) (Morera, Sandoval, & Alfaro, 2021). En términos topográficos estas zonas se ubican en pisos altitudinales de las zonas de vida mayores y pendientes y elevaciones más altas.

### **Principales objetos de política pública para la reducción de la pérdida de cobertura arbórea**

Los bosques y zonas con una alta cobertura arbórea aportan una multitud de beneficios a la sociedad. Albergan la mayoría de la biodiversidad mundial, brindan medios de subsistencia, tienen un papel preponderante en la mitigación y adaptación al cambio climático, brindan agua a las comunidades solo para listar algunos de los servicios que ofrecen.

En consecuencia, detener la degradación boscosa, la pérdida de cobertura arbórea y promover su restauración es vital para proteger la biodiversidad, estabilizar el clima, reducir la carga de gases de efecto invernadero, apoyar medios de vida y contribuir con el desarrollo sostenible.

Si bien es cierto muchas de las pérdidas de dosel arbóreo ocurren de manera aislada y dispersa hay otras que siguen patrones basados en pérdidas arbóreas pasadas y pueden predecirse. Esta condición fue aprovechada por esta investigación abriendo una gama de oportunidades para adelantarse a los eventos y ejecutar acciones proactivas, brindando un marco para priorizar y cuantificar el impacto de estrategias diversas.

La probabilidad de que un área pierda su cobertura arbórea en el futuro es una herramienta transversal valiosa para las iniciativas y políticas públicas relacionadas con el medio ambiente.

Bajo un enfoque de priorización de recursos, las predicciones pueden utilizarse en conjunción con un servicio ecosistémico de interés, como por ejemplo la recarga hídrica para enfocarse en las áreas de mayor riesgo. Adicionalmente, esta herramienta aporta una predicción a cinco años que facilita la definición de objetivos en el corto plazo y permite evaluar de manera preliminar el impacto de políticas y proyectos en comparación con escenarios futuros.

En aras de resguardar la cobertura arbórea y los servicios ecosistémicos que brindan, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Las Áreas Silvestres Protegidas (ASP) juegan un papel fundamental en la protección de la pérdida de cobertura arbórea. La mayoría de las áreas dentro de un ASP tienen una menor probabilidad de ser deforestada y por ende se recomienda incentivar su protección y ampliación. Algunas de las regiones que colindan con zonas sin un régimen de protección tienen una mayor probabilidad de perder su cobertura arbórea y por ende el monitoreo y protección debería enfocarse en tales sectores.



- Puesto que las zonas con mayor riesgo generalmente se ubican en terrenos privados, los esquemas de incentivos para su protección como el pago por servicios ambientales se vuelven especialmente relevantes. En un marco de descarbonización y en el momento histórico en donde parte del financiamiento de estos proyectos -impuesto a los hidrocarburos- es bajo y seguirá en decrecimiento, sería pertinente enfocar los recursos en zonas con las mayores probabilidades de perder su cobertura arbórea para obtener un mayor retorno de la inversión.
- Tanto en el área rural como urbana las bajas densidades de bosques -alto fraccionamiento- contribuyen a la pérdida de cobertura arbórea. Esta condición refuerza la importancia de que los programas de corredores biológicos interurbanos y rurales sean fortalecidos para mejorar la conectividad y así reducir factores que contribuyen a la pérdida de dosel arbóreo.
- Las áreas que se encuentran en las cercanías de cultivos extensivos como la palma, piña y banano se encuentran amenazadas producto de una expansión de la frontera agrícola. Se recomienda la aplicación de herramientas novedosas como el “Monitoreo de Cambio de Uso en Paisajes Productivos” (MINAE, Registro Nacional, CENAT, PNUD., s.f.) que permitan identificar esta expansión y ejecutar acciones concretas de manera ágil.
- Puesto que las áreas boscosas son una medida de adaptación basada en la naturaleza que aminora los efectos negativos de los eventos hidrometeorológicos extremos, es recomendable crear mecanismos de protección para aquellas áreas con mayores probabilidades de pérdida de cobertura arbórea en zonas estratégicas de protección a las comunidades.
- En general, las probabilidades de que un área pierda su cobertura arbórea en el futuro disminuyen conforme se acercan a un río, quebrada o arroyo. Las zonas de protección definidas por la Ley Forestal No. 7575 y su aplicación son relevantes para mantener los recursos forestales y su conectividad. Es recomendable ubicar claramente tales zonas en todo el país siguiendo mecanismos estandarizados como la “Metodología para la delimitación digital de las áreas de protección de ríos, quebradas y arroyos” (INVU, PNUD, 2019) y generar herramientas actualizadas de monitoreo con un enfoque en las áreas con alta probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.
- Se recomienda relacionar información geográfica de servicios ecosistémicos como la recientemente creada “Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana” (Biodiver\_City San José, 2021) para estimar impactos como la fijación de carbono, pérdida de conectividad, entre otros.
- Se recomienda considerar estos resultados como parte de los criterios de selección en proyectos financieros que velen por la conservación como la Tarifa de Protección del Recurso Hídrico impulsada por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, Banca Verde, entre otros.
- Puesto que las zonas con cobertura arbórea actual compiten por diversas actividades productivas, sería relevante dotar a las comunidades de conocimientos y herramientas para aumentar la productividad actual y desarrollar modelos de producción sostenible que eviten la disminución de zonas boscosas y promuevan su incorporación en el sistema productivo.

## **Caso de estudio: Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en la zona de Sarapiquí**

### **Introducción**

Esta investigación tiene como objetivo aplicar un instrumento de predicción de la pérdida de cobertura arbórea en el cantón de Sarapiquí de Heredia a partir del uso de herramientas de aprendizaje automático *-machine learning-* y con el uso de diversas variables de interés para mapear, analizar y explicar los resultados de dicha predicción.

Si bien en Costa Rica desde hace varias décadas se han impulsado esfuerzos tendientes a la recuperación, conservación y uso sostenible del bosque y los recursos forestales, persisten presiones que amenazan la sostenibilidad de los logros alcanzados en esta materia, así como la calidad de los ecosistemas presentes en el país. En situaciones de crisis, o ante el agotamiento y cambio de patrones productivos, de crecimiento urbano y de comercio, esas presiones pueden escalar. Es relevante para el país tener insumos de información que permitan diseñar políticas públicas basadas en evidencia, y dirigir esfuerzos en la política de conservación, de uso y de ordenamiento del territorio, para evitar una importante afectación sobre el patrimonio natural. En tal sentido, resulta relevante aprovechar herramientas modernas de investigación para identificar la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea según la zona, pérdida de cobertura arbórea pasada, la capacidad de uso del suelo, las características geográficas del área, la pendiente, el costo del suelo, el tipo de bosque, la presencia de esquemas de protección, entre otras variables. Es de interés avanzar a modelos que permitan definir y explicar el riesgo de pérdida arbórea futura, para ampliar este análisis.

En suma, con este estudio se busca aprovechar herramientas novedosas para la toma de decisiones y la formulación de política pública en este campo.

### **Objetivo**

El objetivo de esta investigación es aplicar un instrumento de predicción de la pérdida de cobertura arbórea futura en el cantón de Sarapiquí de Heredia, a partir del uso de herramientas de aprendizaje automático *-machine learning-* y el uso de diversas variables de interés para mapear, analizar y explicar los resultados de dicha predicción. Consecuentemente, responderá a las siguientes preguntas:

### **Pregunta general**

- ¿Cuáles son los principales puntos geográficos en riesgo de pérdida de cobertura arbórea que se identifican en Sarapiquí para los próximos cinco años?

### **Preguntas específicas**

- ¿Cuál es la pérdida de cobertura arbórea esperada en Sarapiquí para los próximos cinco años?
- ¿Cuáles son las principales variables asociadas que implican presiones o factores que explican la probabilidad de pérdida arbórea futura en Sarapiquí?

- ¿Cuáles son los principales objetos de política pública que deben considerarse para evitar o reducir la probabilidad de pérdida arbórea futura en Sarapiquí?

## **Definición de conceptos**

### **Áreas con cobertura arbórea**

Las áreas de cobertura arbórea consideradas en esta investigación son aquellas áreas de 30 x 30 m que cuentan con vegetación de una altura mayor a 5m<sup>32</sup> y esta cubre más del 30%<sup>33</sup> del área.

Si bien, por definición, esta base de datos no incluye cultivos de baja altura como piña, hortalizas, arroz, entre otros, en Costa Rica, la base de datos clasifica algunos cultivos en hileras y perennes como bananos, palma aceitera y café como con cobertura arbórea (Cunningham, Cunningham, & Fagan, 2019). Luego de una inspección visual en el cantón de Sarapiquí, es un hecho que algunas áreas dedicadas a la piña y el banano son clasificadas como con cobertura arbórea. Por ende, se debe ser consciente que esta información incluye sesgos de clasificación y se debe tomar en cuenta que la cobertura arbórea incluye otras coberturas adicionales a la cobertura boscosa.

### **Pérdida de cobertura arbórea**

Corresponde a la pérdida total de cobertura arbórea en un área de 30 x 30 m. Se debe considerar que esta pérdida puede ser causada por fenómenos naturales o antropogénicos tales como deforestación, incendios, deslizamientos y corta de plantaciones forestales.

Una vez que se identifica una pérdida, esa área queda marcada como pérdida, aunque posteriormente fuese reforestada.

En esta investigación no se contabiliza la ganancia de cobertura arbórea en ningún caso, esto implica que actividades como la reforestación, regeneración natural o siembra de cultivos forestales no son tomados en cuenta.

### **Línea base**

Los datos toman como punto de partida la cobertura arbórea del año 2000. De esta manera, cuando se registra un punto con pérdida esto quiere decir que un área con cobertura arbórea superior al 30% identificada en el 2000 fue eliminada totalmente en un año específico.

## **Antecedentes**

En sus inicios, Costa Rica fue un territorio prácticamente libre de deforestación. A partir de la década de los cincuenta la deforestación inició a un ritmo creciente llegando a un pico en la década de los ochentas (FAO, 2015), desde entonces, la deforestación ha ido en decrecimiento. A partir del año 2000, el área forestal ha aumentado hasta alcanzar cerca del 54% de la cobertura nacional en el 2015 (FAO, 2016).

De acuerdo con Sierra et al (2016) durante 1987 y 1997 Sarapiquí fue el cantón en el país donde se registró la mayor deforestación. Durante el periodo 1997-2008 fue el quinto cantón con

mayor deforestación registrada y fue hasta el periodo 2008-2013 que se registró una ganancia forestal neta  $-0,1 \text{ km}^2$ .

A pesar de haber tenido una ganancia forestal neta positiva recientemente, el organismo Global Forest Change (GFC) detectó una pérdida de cobertura arbórea en Sarapiquí de  $145,6 \text{ km}^2$  (Universidad de Maryland y Global Forest Change, 2020) ocurrida durante los años 2000 y 2020.

Esta pérdida mal gestionada afecta negativamente la producción y el consumo sostenible, la conservación de la biodiversidad, los diversos servicios ecosistémicos que brindan a las comunidades y la mitigación y adaptación de cambio climático. Por ende, conocer la ubicación de las zonas más vulnerables a perder su cobertura arbórea es vital para promover el desarrollo sostenible. A pesar de ello, en Costa Rica estas zonas no se encuentran identificadas y por lo tanto dificultan un enfoque estratégico de los recursos disponibles.

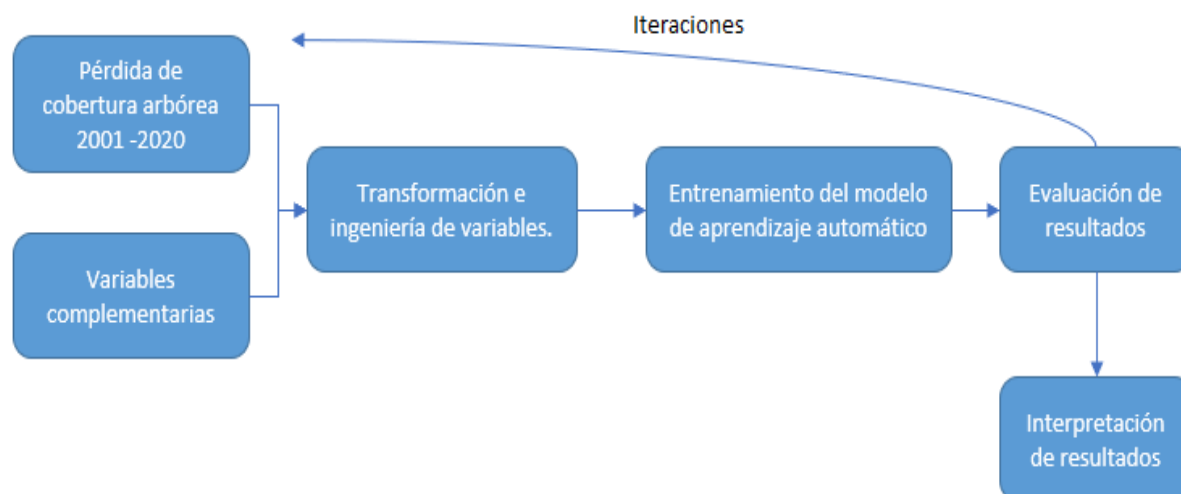
En Costa Rica la pérdida boscosa está asociada a diferentes factores como la accesibilidad, competencia de las actividades económicas alternativas a la conservación, el régimen de la tenencia, concentración de la deforestación, entre otros (MINAE, 2015). Muchos de estos factores junto con los patrones de pérdida pasada tienen componentes o estimadores que pueden representarse como una serie de tiempo de capas geográficas.

Esta información permite crear modelos basados en datos que aprenden de comportamientos pasados y permiten predecir la magnitud y ubicación de pérdida de cobertura arbórea futura. Modelos de esta categoría se han aplicado en diferentes partes del mundo como Borneo<sup>34</sup>, Belice<sup>35</sup>, Indonesia<sup>36</sup>, Vietnam<sup>37</sup>, entre otros. Históricamente el modelo más comúnmente utilizado para la predicción de pérdida boscosa es la regresión logística (Cushman, Macdonald, Landguth, Malhi, & Macdonald, 2017) sin embargo, debido a los avances en la capacidad de procesamiento y en las técnicas de aprendizaje automático, es posible implementar modelos con un grado mayor de complejidad que resulten en predicciones con mayor precisión.

Esta investigación es una primera aproximación para predecir la pérdida de cobertura arbórea en Sarapiquí utilizando modelos no paramétricos complejos de aprendizaje automático -ensamble basado en árboles de decisión- en conjunción con la base de datos GFC y otras fuentes de información pública. Por limitaciones en la base de datos y la metodología empleada, las predicciones están limitadas a la pérdida de cobertura de arbórea que puede incluir otras coberturas diferentes a bosques y a un horizonte predictivo de 5 años. Futuros análisis podrán hacer uso de otras bases de datos, cruzar información para encontrar impactos en áreas y usos del suelo específicos o implementar diferentes modelos para comparar o mejorar las métricas alcanzadas en esta investigación.

## **Metodología**

En este apartado se describe brevemente<sup>38</sup> el procedimiento realizado para entrenar y aplicar un algoritmo de aprendizaje automático supervisado que predice la pérdida de cobertura arbórea durante el periodo de 2021 al 2025 en Sarapiquí mediante la identificación de relaciones multivariadas complejas.



En primer lugar, se utilizaron diferentes bases de datos de acceso público siendo la más relevante la base de datos del GFC publicada originalmente por Hansen et al. (2011). Esta base de datos, entre otras cosas, cuenta con la cobertura arbórea global durante las últimas dos décadas con una frecuencia anual y una resolución de 30 x 30m. La base de datos utilizó como insumos las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y desde el 2013 Landsat 8.

Es importante mencionar que las áreas con cobertura arbórea pueden incluir bosques, humedales, plantaciones forestales y algunos cultivos en hileras y perennes como bananos, palma aceitera y café (Cunningham, Cunningham, & Fagan, 2019). Tal base de datos está sujeta a una incertidumbre propia de procesos de clasificación y por ende es de esperar que no todas las zonas estén correctamente clasificadas.

Junto con esta base de datos se recopiló información relevante de otras fuentes como el índice de desarrollo social, la capacidad del uso del suelo, elevación, pendiente, cercanía a carreteras, ríos, poblados, entre otros.

La información fue transformada mediante un proceso denominado ingeniería de variables y agrupada por quinquenios para favorecer el aprendizaje automático. 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, Soukhavong, & Lamb, 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 bajo la curva ROC - *Receiver Operation Characteristic* (ROC)- promedio de 0,765 en el cantón de Sarapiquí. Esta métrica provee una medida agregada del desempeño del modelo a través 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 un 1 un modelo perfecto. En este caso, el valor 0,765

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 a predecir que deberán ser tomados en cuenta a la hora de utilizar los resultados de esta investigación.

Finalmente, los resultados son interpretados para confirmar la correcta ejecución del modelo y brindar conocimientos adicionales a las propias predicciones. En esta fase se aplicó la metodología de “Valores Shapley” (Lundberg & Lee, 2017) y se caracterizaron las predicciones basadas en diversas variables de interés.

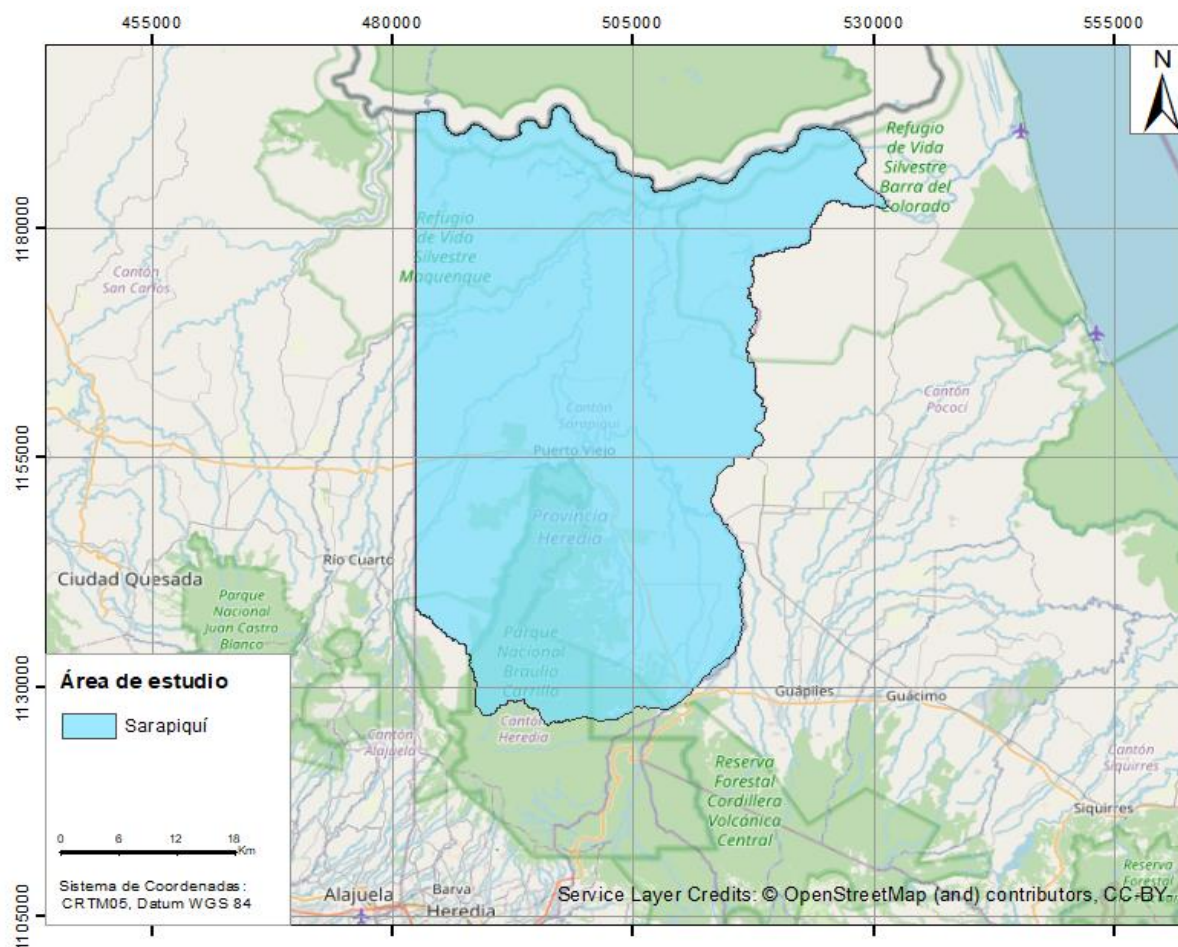
## Probabilidad de pérdida de cobertura arbórea en Sarapiquí

### Unidad de estudio

La predicción de la pérdida arbórea se realizó en el cantón de Sarapiquí el cual cuenta con un área de 2.142 km<sup>2</sup> a una escala de 30 x 30 m.

Mapa 15

### Unidad de estudio: Sarapiquí

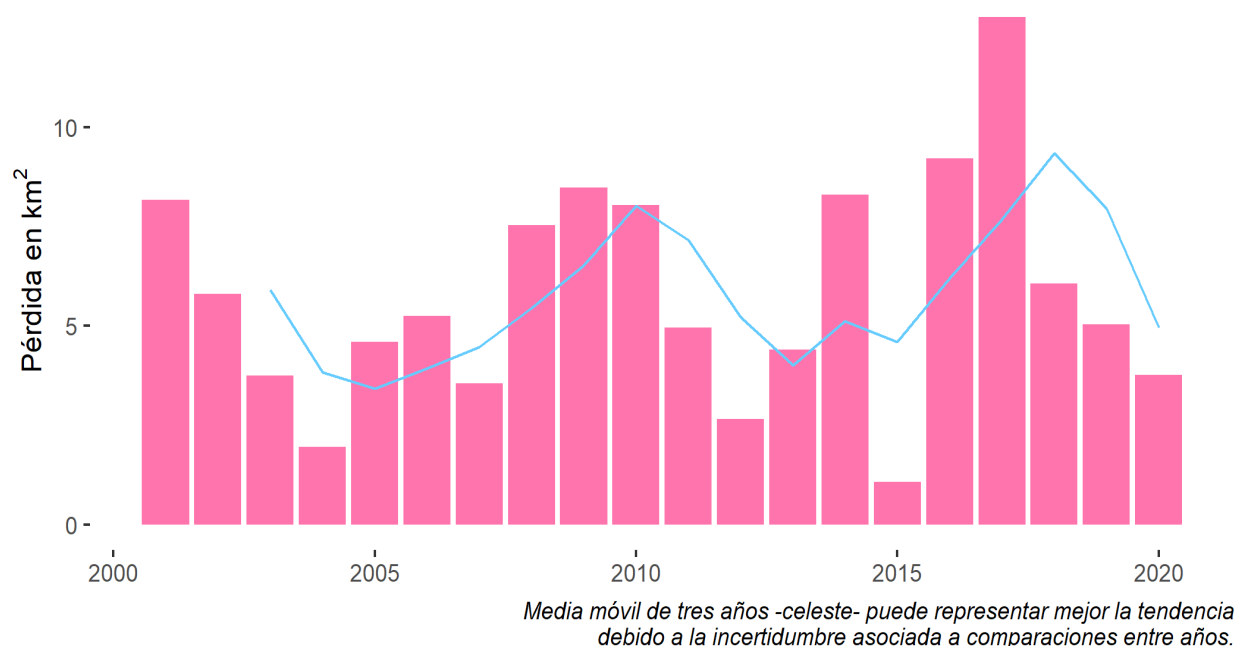


## Situación actual y pasada 2000-2020

De acuerdo con la información del GFC, Sarapiquí poseía un 84.2% -1.804 km<sup>2</sup>- de su territorio con cobertura arbórea en el año 2000. Del año 2001 al 2020, Sarapiquí ha perdido un estimado de 115,4 km<sup>2</sup> de tal área -sin considerar ganancias de cobertura arbórea-. Esto equivale a un 6,40% de la cobertura arbórea encontrada en el año 2000 la cual es prácticamente igual al porcentaje de pérdida nacional -6,45%-.

Gráfico 20

### Pérdida de cobertura arbórea en Sarapiquí. 2001-2020



Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

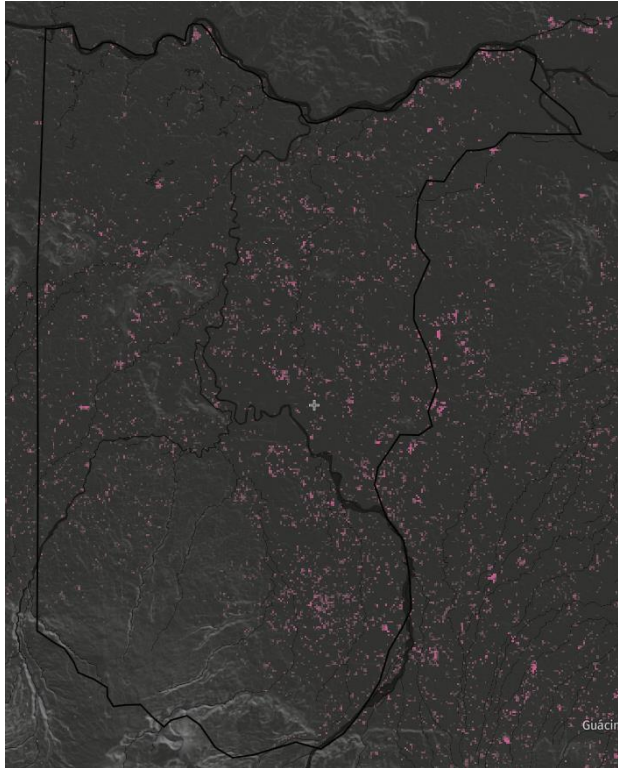
Tal y como se observa en el gráfico 20, la pérdida de cobertura arbórea tiene una alta dispersión en el tiempo y sigue una tendencia global estable.

Especialmente, esta pérdida se puede ver en las siguientes cuatro imágenes que representan en rosado la pérdida de cobertura arbórea acumulada en el país en los últimos cuatro quinquenios.

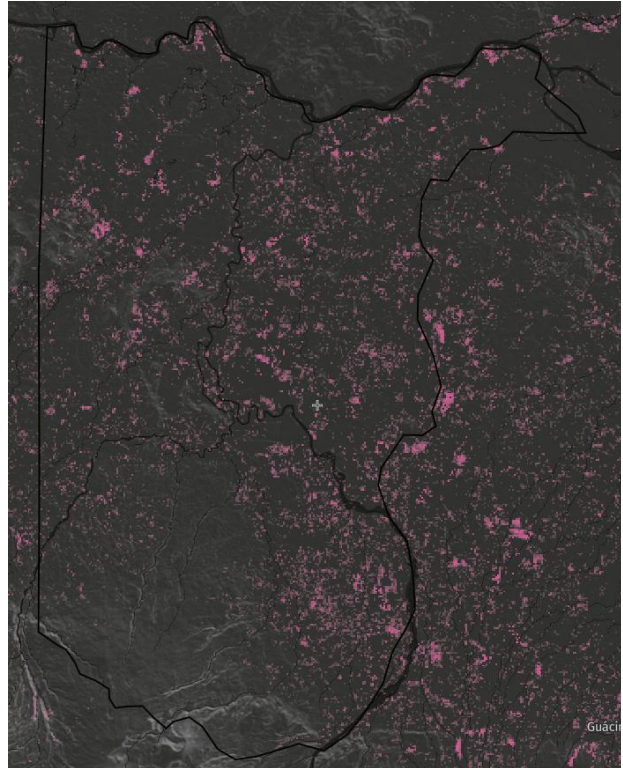
Mapas 16

**Pérdida de cobertura arbórea en Sarapiquí**

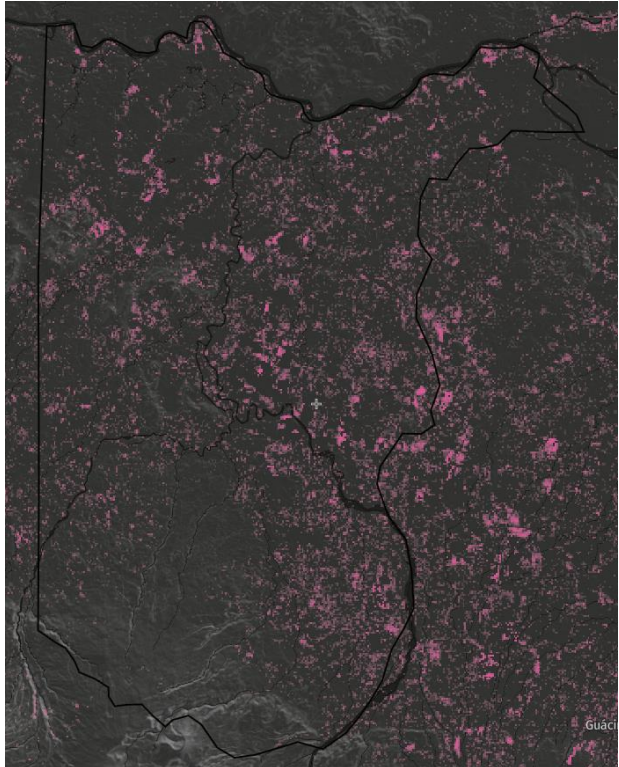
a) 2001-2005



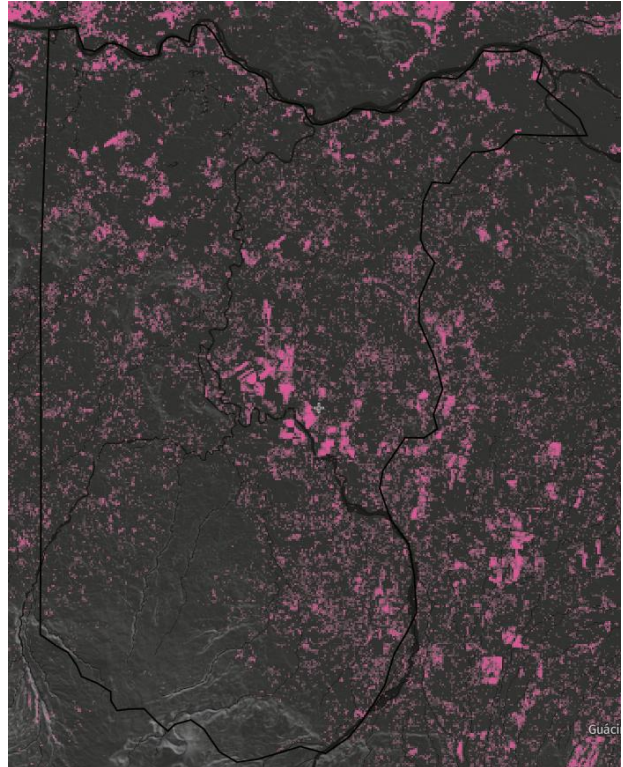
b) 2001-2010



c) 2001-2015



d) 2001-2020



Fuente: Elaboración propia con datos GFC, 2021.



Los mapas anteriores muestran como las pérdidas de cobertura arbórea de cada quinquenio tienen una asociación con patrones pasados. Es evidente que algunas zonas de pérdida arbórea cerca del sector central y este del distrito de Horquetas y las cercanías del Río Sucio a la altura de Puerto Viejo de Sarapiquí, se expanden a lo largo de los años indicando una concentración de la pérdida. Adicionalmente, áreas protegidas como el Parque Nacional Braulio Carrillo y la Reserva Biológica la Selva tienen una pérdida prácticamente nula en los últimos 20 años.

### **Predicción**

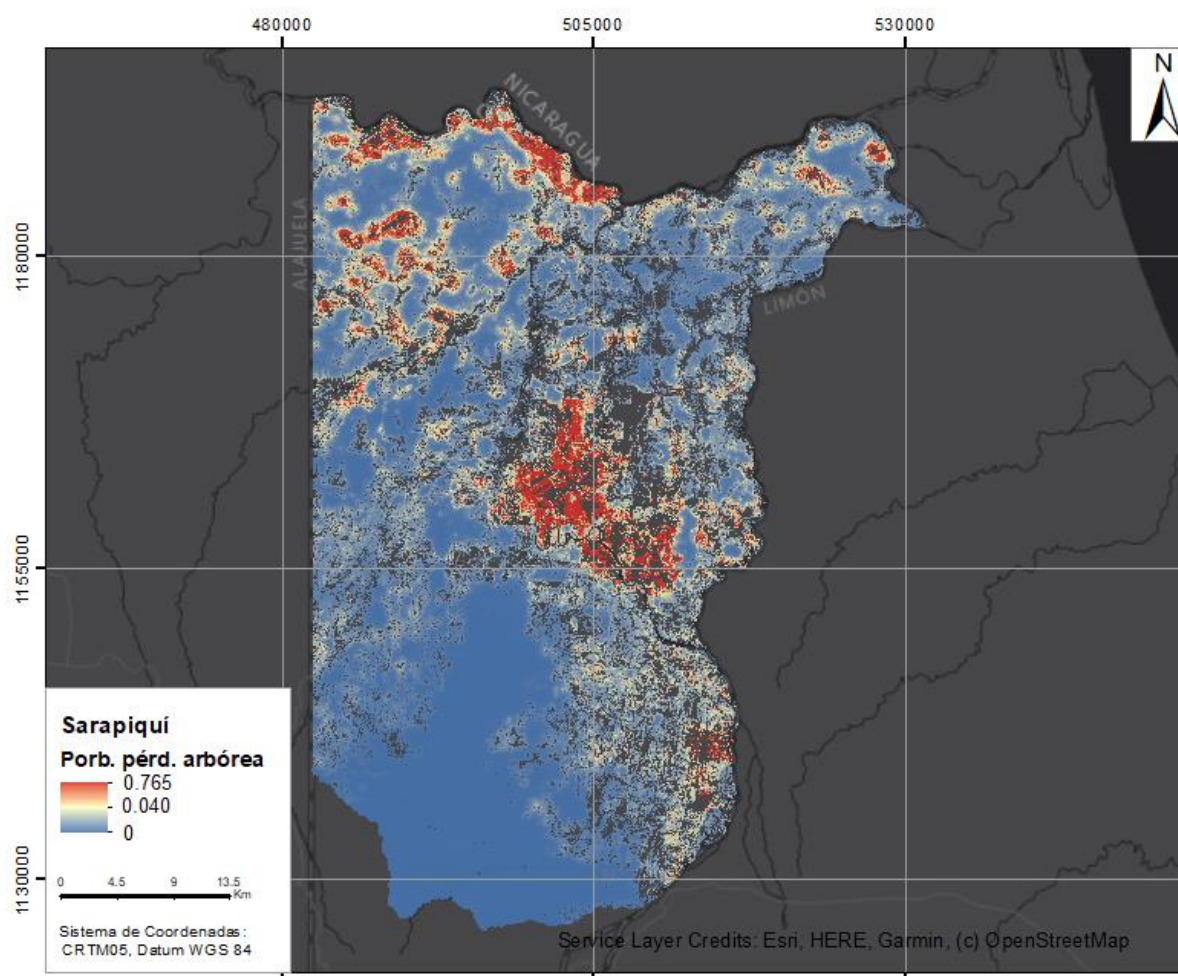
Cada punto del cantón con cobertura arbórea tiene asociado un nivel de riesgo de perderla en el futuro. La pérdida puede ocurrir por eventos naturales como deslizamientos, eventos hidrometeorológicos o variaciones climáticas y antropogénicas como la deforestación, rotación y corta de cultivos, incendios inducidos, entre otros.

Puesto que una parte de tal riesgo está asociado al comportamiento del entorno de cada punto y de sus características individuales tanto en el presente como en el pasado, es posible utilizar algoritmos complejos de aprendizaje automático que analicen tales variables y predigan la probabilidad de perder la cobertura arbórea en el futuro. Luego de aplicar, validar y probar un algoritmo de aprendizaje automático, se estimó la probabilidad de perder la cobertura arbórea en los próximos 5 años para todas las áreas de 30 x 30 m en el territorio nacional.

En el mapa 17 se pueden apreciar los resultados que corresponden a las probabilidades de la pérdida arbórea durante el periodo 2021 - 2025.

Mapa 17

**Probabilidad de pérdida arbórea. 2021-2025**



a/ Colores rojizos indican una mayor probabilidad y azules una menor probabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

En el mapa 17 destacan zonas con baja probabilidad de perder su cobertura arbórea que están asociadas a áreas protegidas como el Parque Nacional Braulio Carrillo, la Reserva Biológica la Selva, el Área de Conservación Central, el Refugio Nacional de Vida Silvestre Barra del Colorado, Lapa Verde, La Tirimbina y Tapiria y áreas con mayores pendientes y elevaciones.

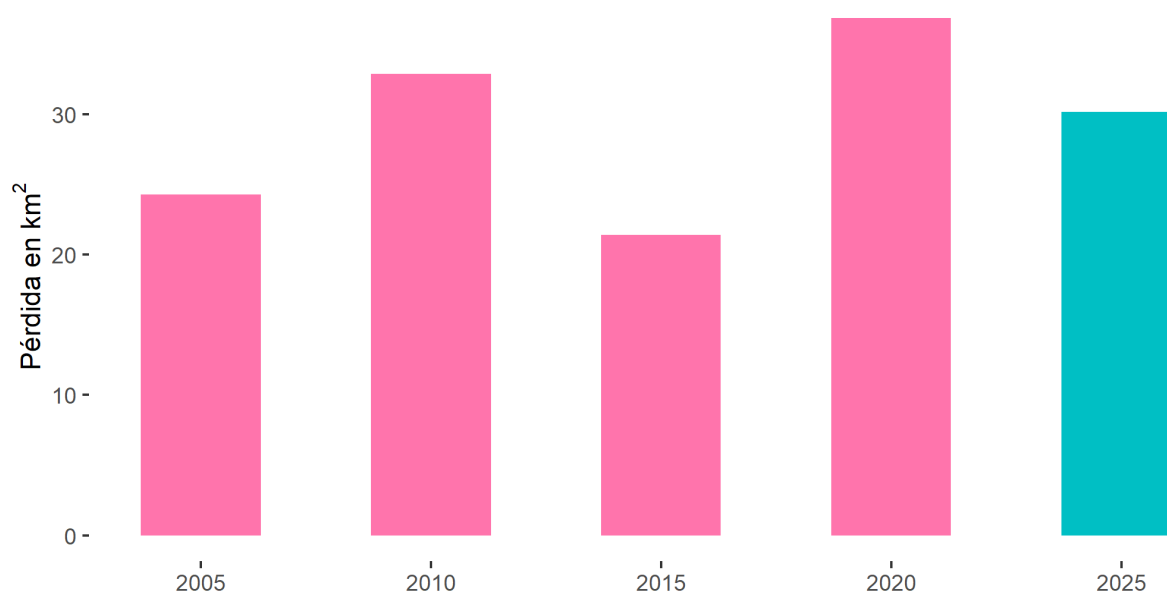
En caso contrario, las áreas en riesgo de perder su cobertura arbórea en el periodo 2021 al 2025 se concentran en zonas asociadas a bajas pendientes y elevaciones, cercanía de monocultivos como el banano, piña y palma y áreas dedicadas a la ganadería.

### Pérdida de cobertura arbórea esperada

De acuerdo con la probabilidad estimada para cada píxel de 30 x 30m, se espera que durante el año 2021 y hasta el 2025 ocurra una pérdida cobertura arbórea cercana a los 30,2 km<sup>2</sup> en Sarapiquí. Esta pérdida corresponde a un 1,79% de la cobertura arbórea del cantón. A continuación, en el gráfico 21 se observa la pérdida de cobertura arbórea<sup>39</sup> registrada por quinquenios en los últimos 20 años y la predicción del periodo 2021-2025.

Gráfico 21

#### Pérdida de cobertura arbórea por quinquenios en Sarapiquí



a/ Rosado: Pérdida observada, Celeste: Pérdida esperada.

Fuente: Elaboración propia con datos del GFC, 2021.

La predicción muestra un escenario intermedio en relación con las pérdidas registradas en el pasado. Si bien la pérdida esperada para el quinquenio 2021-2025 es un 18% menor respecto al periodo anterior, la pérdida esperada es ligeramente mayor al promedio registrado en las últimas dos décadas -28,9 km<sup>2</sup>-.

Con base en predicciones nacionales y regionales<sup>40</sup>, el cantón tendrá una pérdida esperada mayor que el promedio nacional y similar al de las regiones con mayores pérdidas -Zona Norte y Pacífico Sur-.

Cuadro 3

#### Pérdida porcentual de cobertura arbórea esperada a nivel regional y nacional. 2021-2025

| Zona | Pérdida 2016-2020 (km <sup>2</sup> ) | Pérdida esperada 2021-2025 (km <sup>2</sup> ) | Variación (%) | Pérdida esperada/ |
|------|--------------------------------------|---|---------------|-------------------|
|------|--------------------------------------|---|---------------|-------------------|

|                         |        |        |        | <b>cobertura al<br/>2020 (%)</b> |
|-------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------|
| <b>Zona Norte</b>       | 210,52 | 154,92 | -26,41 | 2,05                             |
| <b>Pacífico Sur</b>     | 149,50 | 138,13 | -7,61  | 1,75                             |
| <b>Zona Caribe</b>      | 234,30 | 140,93 | -39,85 | 1,29                             |
| <b>Pacífico Central</b> | 55,55  | 48,24  | -13,17 | 1,19                             |
| <b>Pacífico Norte</b>   | 30,69  | 32,42  | 5,66   | 0,52                             |
| <b>Costa Rica</b>       | 680,56 | 514,64 | -24,38 | 1,40                             |
| <b>Sarapiquí</b>        | 36,87  | 30,17  | -18,18 | 1,79                             |

Fuente: Elaboración propia.

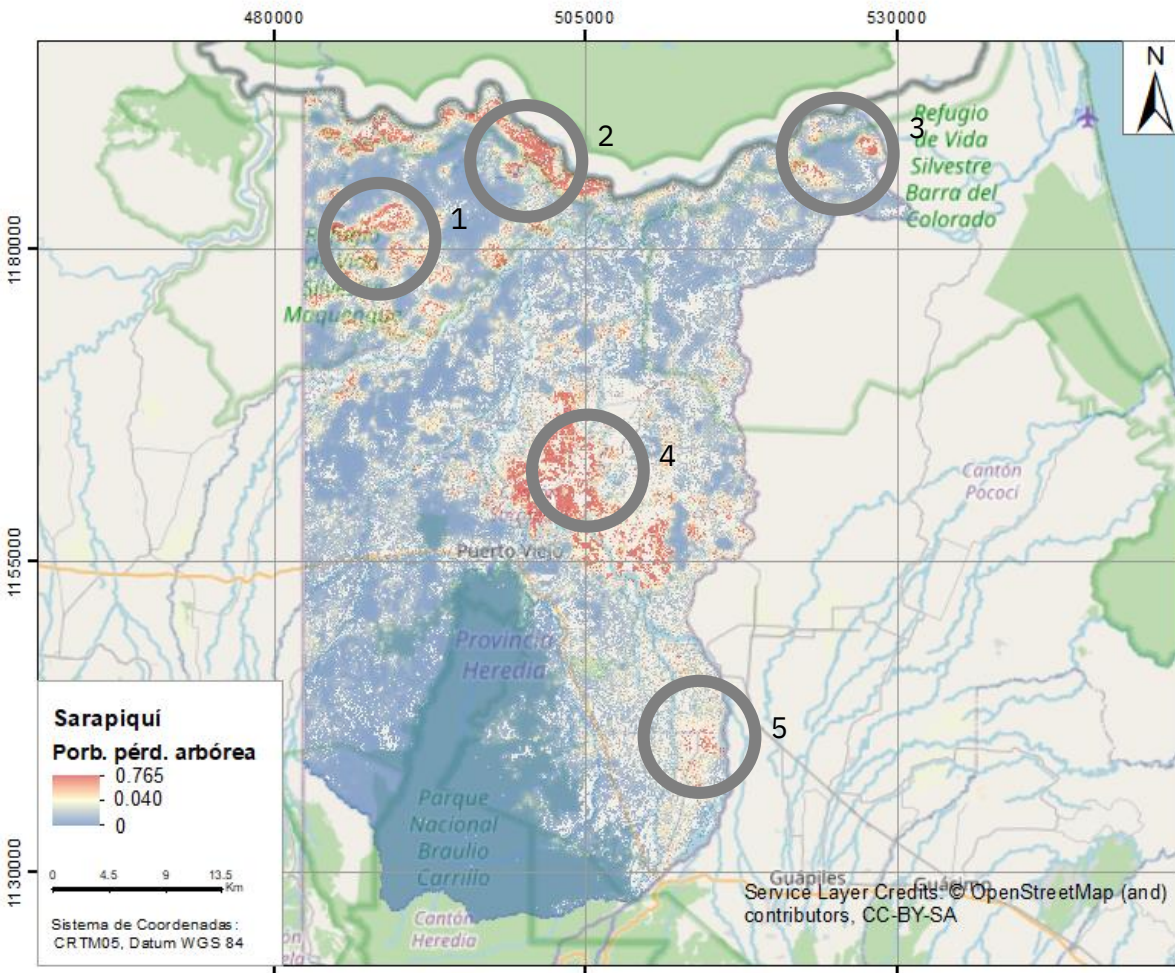
Los impactos de esta pérdida arbórea podrían ser vastos y dependientes de las características del área donde ocurran -bosques, humedales, plantaciones forestales, trama verde urbana, entre otros-. La pérdida mal gestionada atentará contra los ecosistemas que albergan, la adaptación y mitigación del cambio climático, el desarrollo sostenible y los variados servicios ecosistémicos que brindan a las comunidades.

### **Zonas calientes**

En la siguiente figura se seleccionaron cinco zonas con altas probabilidades de pérdida arbórea en el horizonte predictivo que permiten ejemplificar diversos factores que pueden incidir en el cambio de cobertura forestal en el cantón.

Mapa 18

**Selección de cinco zonas de áreas con alta probabilidad de pérdida arbórea<sup>41</sup>**



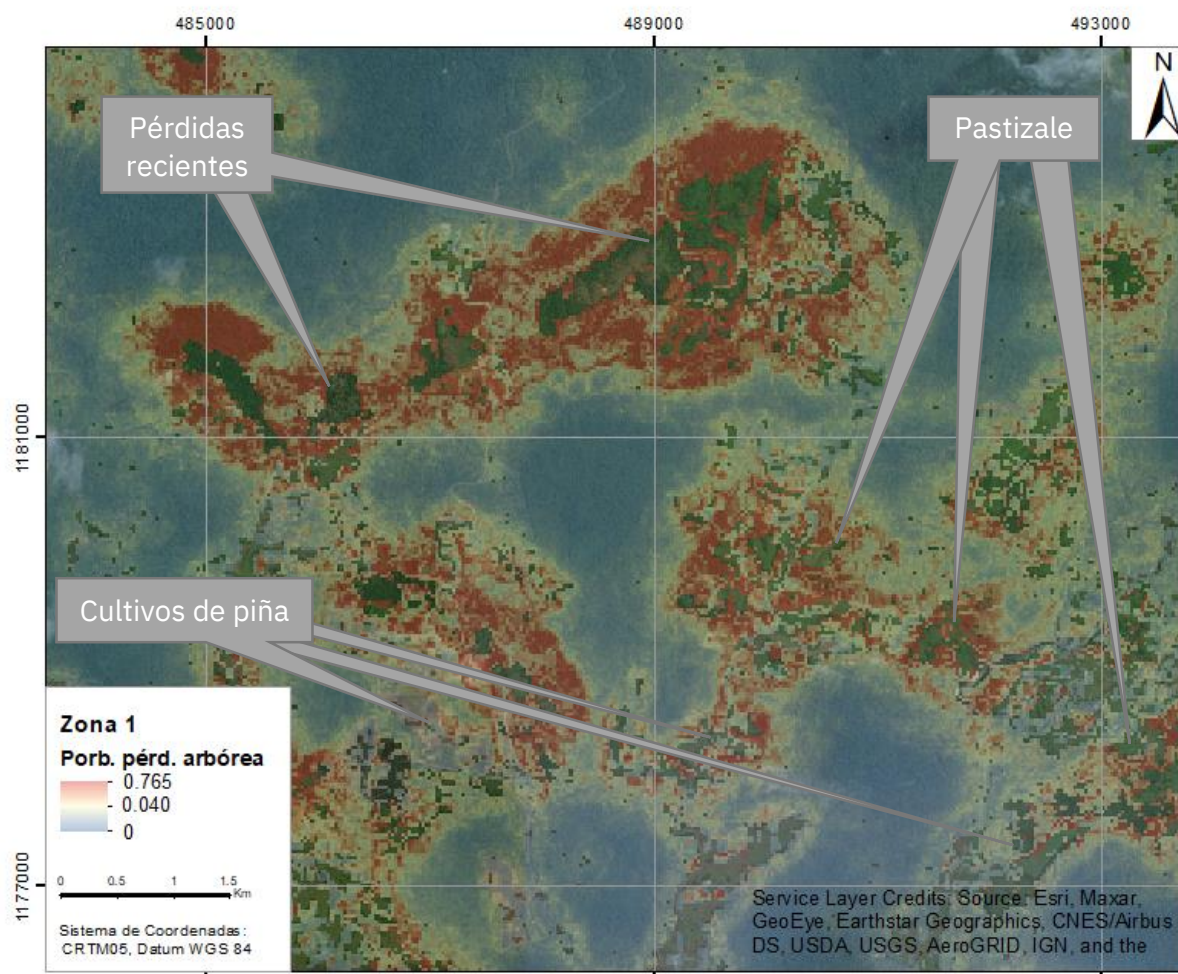
Fuente: Elaboración propia.

### Zona 1

La Zona 1 se ubica en la región central del distrito Cureña.

Mapa 19

#### Probabilidad de pérdida arbórea en la Zona 1



Fuente: Elaboración propia.

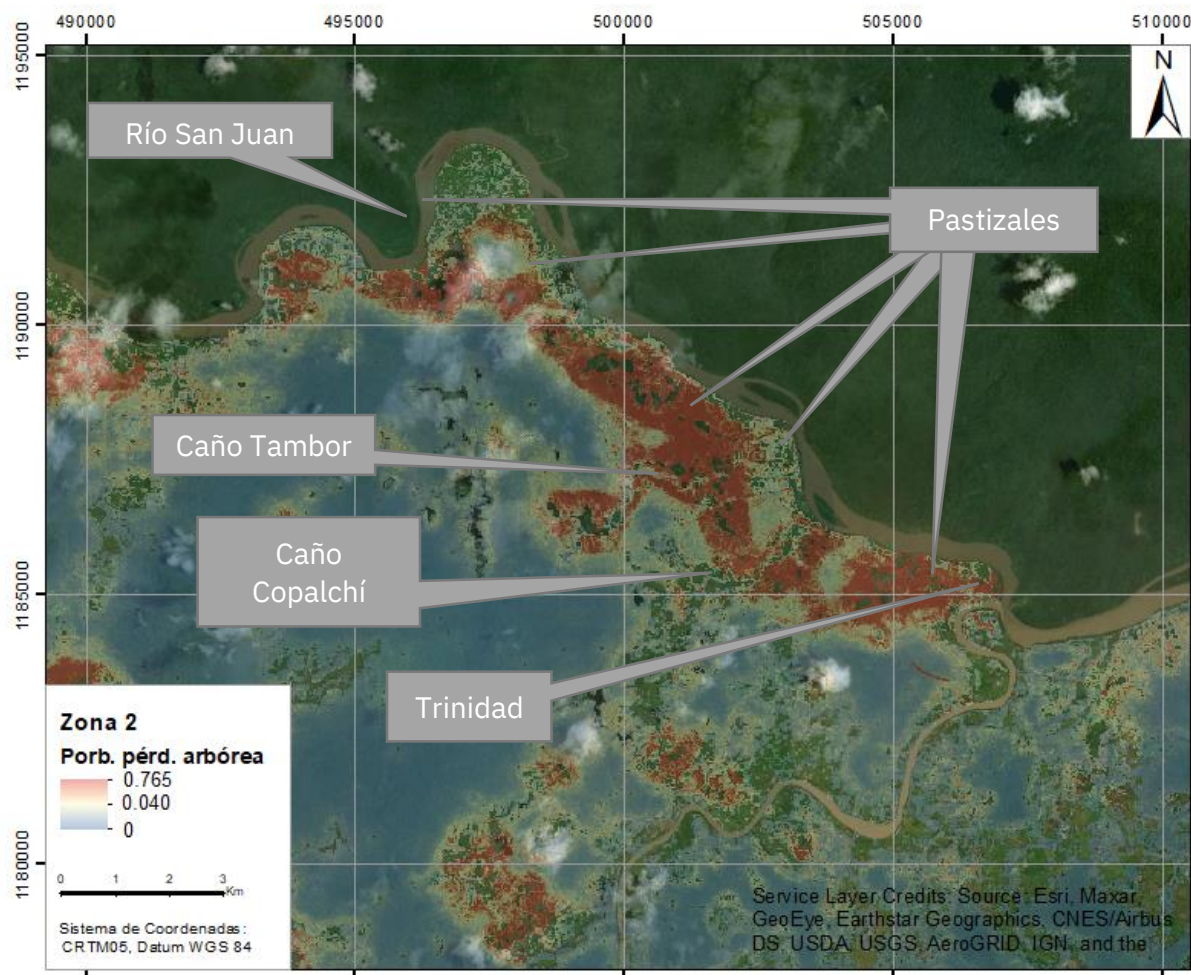
De acuerdo con información del MOCUPP<sup>42</sup>, en la zona se ubican cultivos de piña en la parte inferior de la imagen, a su vez extensiones de terreno principalmente con cobertura de pastos en el extremo este. En los últimos 5 años<sup>43</sup> se ha presentado una pérdida importante de cobertura arbórea en los interiores de la zona rojiza que ejerce presión sobre la cobertura arbórea en su cercanía.

## Zona 2

La zona 2 se ubica en el extremo noroeste del distrito de Cureña entre las comunidades de Remolinito y Trinidad a lo largo de la carretera Juan Rafael Mora Porras.

Mapa 20

### Probabilidad de pérdida arbórea en la Zona 2



Fuente: Elaboración propia.

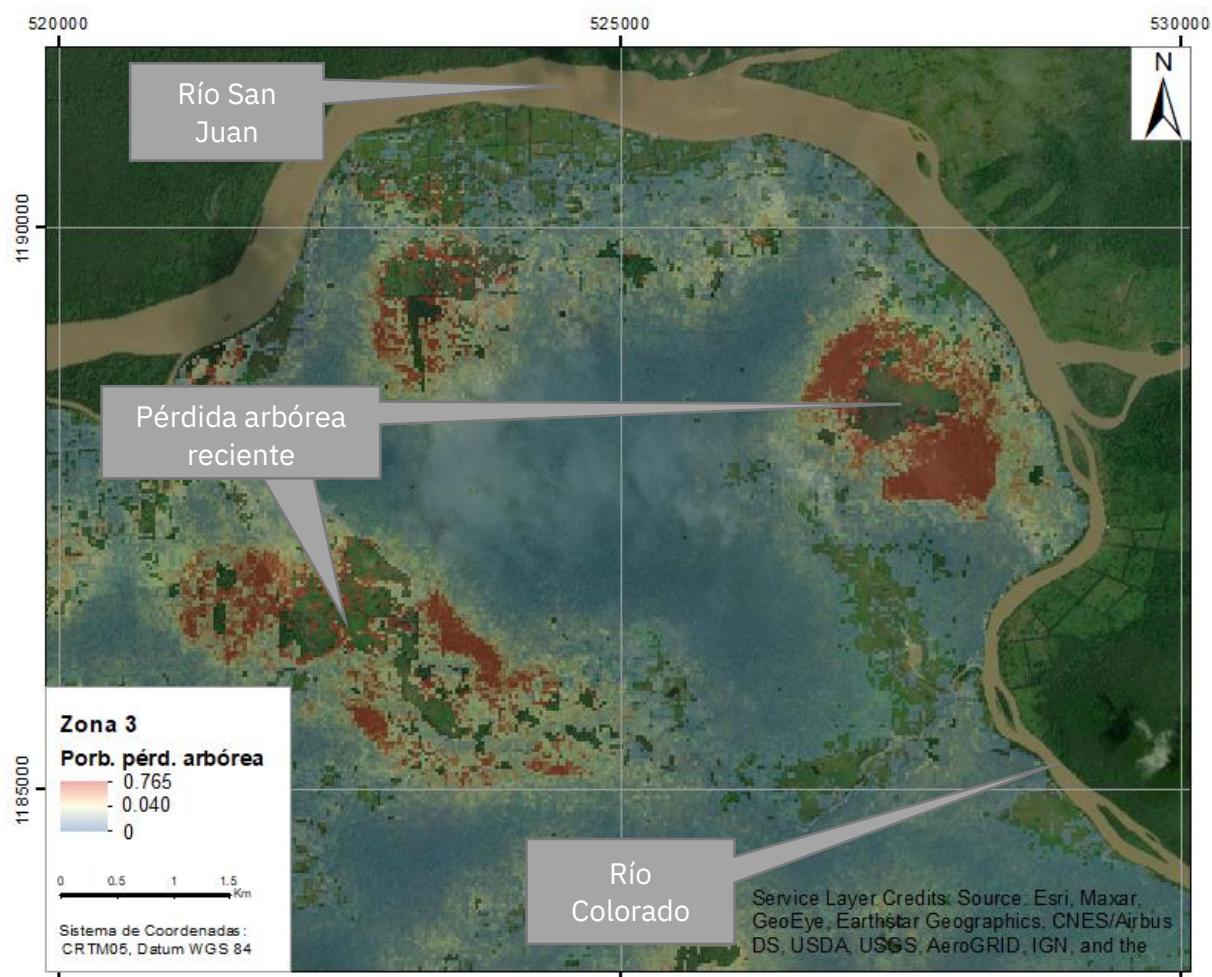
De acuerdo con información del MOCUPP<sup>44</sup>, en la zona se ubican una importante cantidad de áreas cubiertas con pastos en la margen derecha del Río San Juan y en las cercanías de los Ríos Caño Copalchí y Caño Tambor.

### Zona 3

La Zona 3 se ubica en el extremo noreste del distrito de las Llanuras del Gaspar.

Mapa 21

#### Probabilidad de pérdida arbórea en la Zona 3



Fuente: Elaboración propia.

Esta zona tiene características muy similares a la Zona 3 en donde existe presencia de terrenos con cobertura de pastizales en las cercanías del Río San Juan y la carretera Juan Rafael Mora Porras. Este patrón se extiende también en la margen derecha del Río Colorado y sus afluentes. En los últimos 5 años<sup>45</sup> se ha presentado una pérdida importante de cobertura arbórea en los interiores de las dos zonas rojizas y ahora cuentan con una cobertura de pastizales.

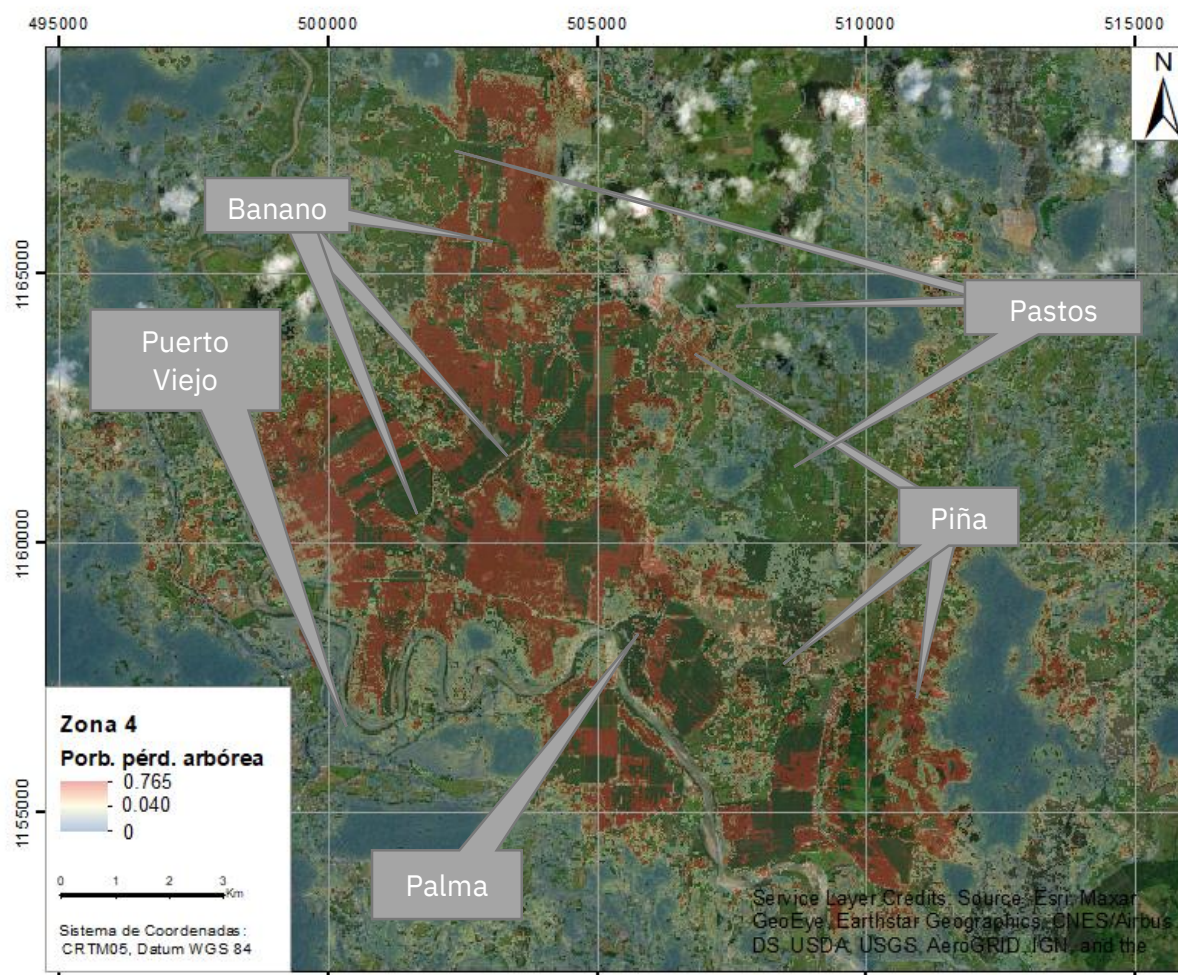


#### Zona 4

La Zona 4 se ubica en el distrito de Puerto Viejo de Sarapiquí, en una región ubicada al noreste de la comunidad de Puerto Viejo.

Mapa 22

#### Probabilidad de pérdida arbórea en la Zona 4



Fuente: Elaboración propia.

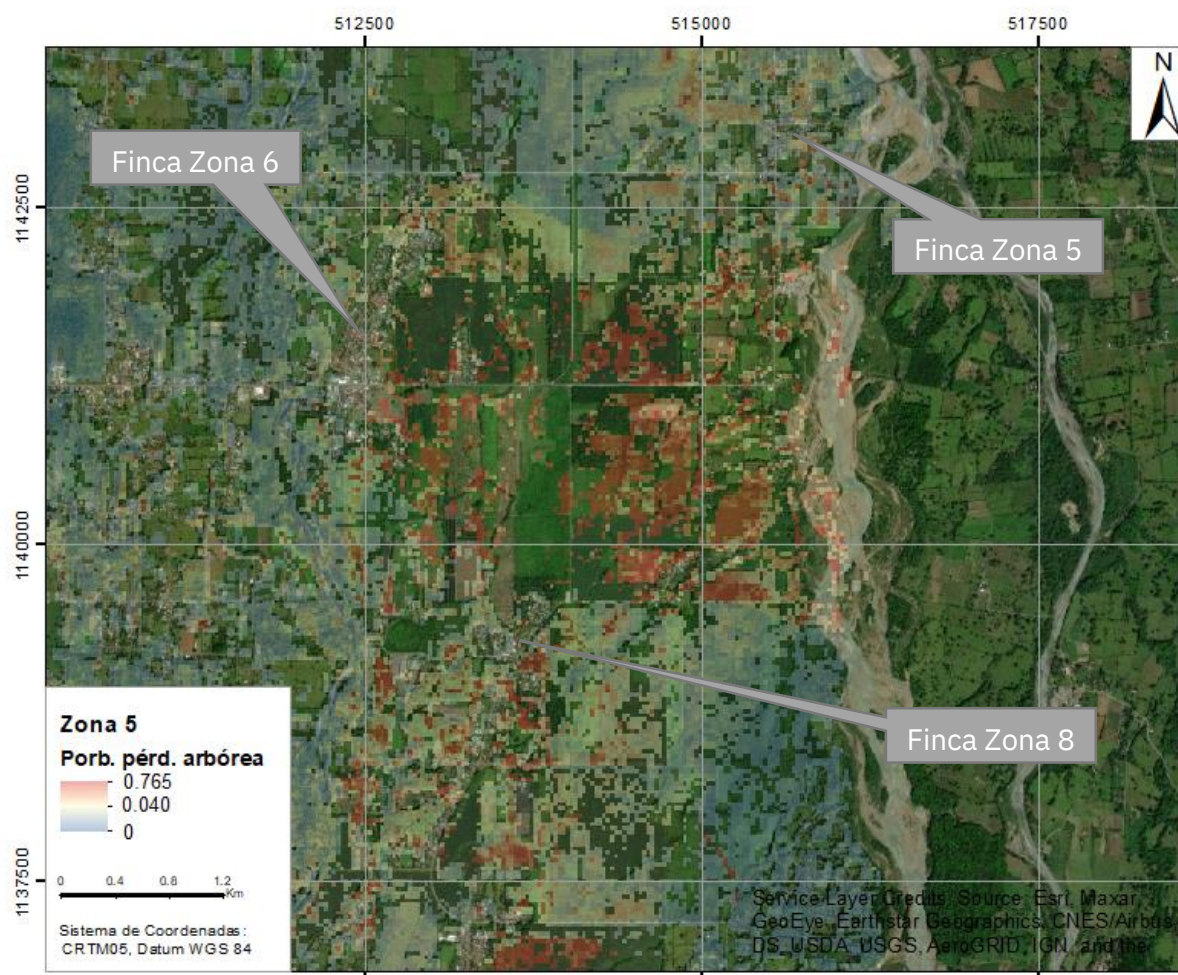
Esta zona se caracteriza por tener una alta densidad de cultivos de banano, algunos cultivos de palma aceitera y piña, así como vastos terrenos dedicados a la ganadería. Las zonas rojizas se ubican mayoritariamente cerca o dentro del paisaje agrícola en comparación con las zonas dedicadas a la ganadería.

### Zona 5

La Zona 5 se ubica en el extremo este del distrito de Horquetas, en las cercanías de Zona Chirripó y las Fincas Zona 6, 7, 8 y 10.

Mapa 23

#### Probabilidad de pérdida arbórea en la Zona 5



Fuente: Elaboración propia.

Esta zona se caracteriza por la siembra de banano, plátano, palmito y yuca, así como terrenos dedicados a la ganadería.

Todas estas zonas tienen probabilidades altas de modificar su cobertura actual y comparten presiones principalmente por las actividades agropecuarias. Las Zonas 2 y 3 tienen presiones mayoritariamente producto de la actividad ganadera, la Zona 1 también tiene una importante presencia de terrenos dedicados a la ganadería que, junto con siembra de cultivos como la piña son los posibles disparadores de futura pérdida arbórea. Por último, las Zonas 4 y 5 tienen

cultivos más estructurados de banano, palma y otros que tienen un impacto directo en la pérdida de cobertura esperada.

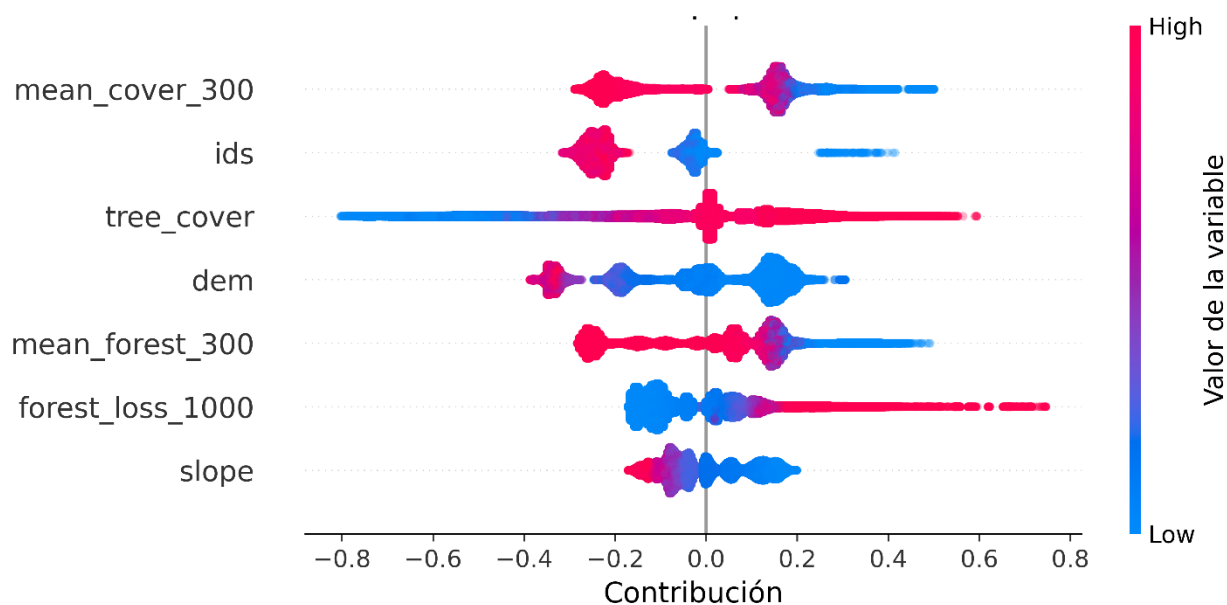
### **Contribución a la predicción de las variables utilizadas en el modelo**

Si bien la predicción de la pérdida de cobertura arbórea es de gran utilidad puesto que permite cuantificar y localizar la pérdida arbórea para la toma de decisiones, también es relevante cuantificar el aporte relativo de las variables<sup>46</sup> más importantes utilizadas en el modelo. Tal cuantificación permite validar el funcionamiento del modelo y brindar información clara para el entendimiento de los factores que impactan de mayor manera en la predicción de pérdida arbórea.

En el gráfico 21 se visualiza en el eje “x” la contribución marginal de las siete variables con mayor impacto promedio en el modelo. Las contribuciones positivas indican aportes a favor de la pérdida de cobertura arbórea y viceversa. Por otro lado, los valores altos de las variables están coloreados en rosado y los valores bajos en azul. La cantidad de observaciones -áreas de 30 x 30m- de cada variable se ve reflejada en la amplitud del eje “y”.

Gráfico 21

### **Contribución de las variables<sup>a/</sup> a la predicción en el cantón de Sarapiquí**



a/ Variables ordenadas en orden descendente según su impacto promedio en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

En esta región, las siete variables con mayores contribuciones son:

### **Porcentaje promedio de cobertura arbórea en los últimos 5 años a trescientos metros de cada punto de estudio -mean\_cover\_300-.**

Esta variable indica que las áreas con un radio de 300m que tienen una cobertura forestal baja contribuyen a la pérdida arbórea. En general aquellas áreas con un alto porcentaje de cobertura arbórea aportan a la conservación de la cobertura.

**Índice de desarrollo social distrital -ids-**

Esta variable indica que los índices de desarrollo social altos contribuyen de mayor manera a la conservación que aquellos IDS más bajos.

**Porcentaje de cobertura arbórea -tree\_cover-**

Las áreas con un menor porcentaje de cobertura arbórea contribuyen de manera negativa a la pérdida futura. Las áreas con una mayor cobertura arbórea aportan en algunas ocasiones a favor de la pérdida y en otras en contra dependiendo de los valores de las demás variables.

**Elevación -dem-**

La variable elevación contribuye a la conservación de la cobertura en las elevaciones más altas del cantón. Las elevaciones bajas aportan tanto a favor como en contra de la pérdida arbórea.

**Cantidad de áreas con cobertura arbórea promedio en los últimos 5 años a trescientos metros de cada punto de estudio -mean\_forest\_300-**

Esta variable indica que, si la cantidad de áreas de 30x30m en un radio de 300m con cobertura forestal es baja, estas contribuyen a la pérdida arbórea. En general aquellas áreas de 300m de radio con una alta cantidad de unidades de 30x30m con cobertura arbórea aportan a la conservación de la cobertura.

**Pérdida de cobertura arbórea en los últimos cinco años a tres kilómetros alrededor de cada punto de estudio -forest\_loss\_3000-**

En general, cuanto mayor es la pérdida de cobertura registrada en un radio de tres kilómetros en los últimos cinco años, mayor es la contribución a perder su propia cobertura en el futuro.

**Pendiente -slope-**

La variable pendiente contribuye a la conservación de la cobertura en las pendientes más altas del cantón. Las pendientes bajas por lo general aportan a favor de la pérdida arbórea.

Cuatro de las siete variables más importantes corresponden a modificaciones y características de la cobertura del suelo de áreas cercanas y en el área individual de estudio. Una de ellas está asociada a la magnitud de la pérdida de cobertura arbórea en el último quinquenio -forest\_loss\_3000-, dos de ellas describen calidad -mean\_cover\_300- y cantidad -mean\_forest\_300- de las zonas con cobertura arbórea en el entorno cercano al área en cuestión y, por último, la variable “tree\_cover” da información acerca de la calidad de la cobertura arbórea en el área de 30x30m que se analizó.

En conjunto con estas variables, juega un papel importante el índice de desarrollo social el cual contribuye a la conservación de la cobertura arbórea cuando tiene valores altos -Horquetas y La Virgen- y de menor manera aquellos distritos con valores menores. También las condiciones topográficas como la pendiente y la elevación aportan positivamente a la conservación cuando

tienen valores más elevados. Estas particularidades del terreno coinciden con terrenos de difícil acceso, algunas áreas silvestres protegidas y una menor vocación agrícola.

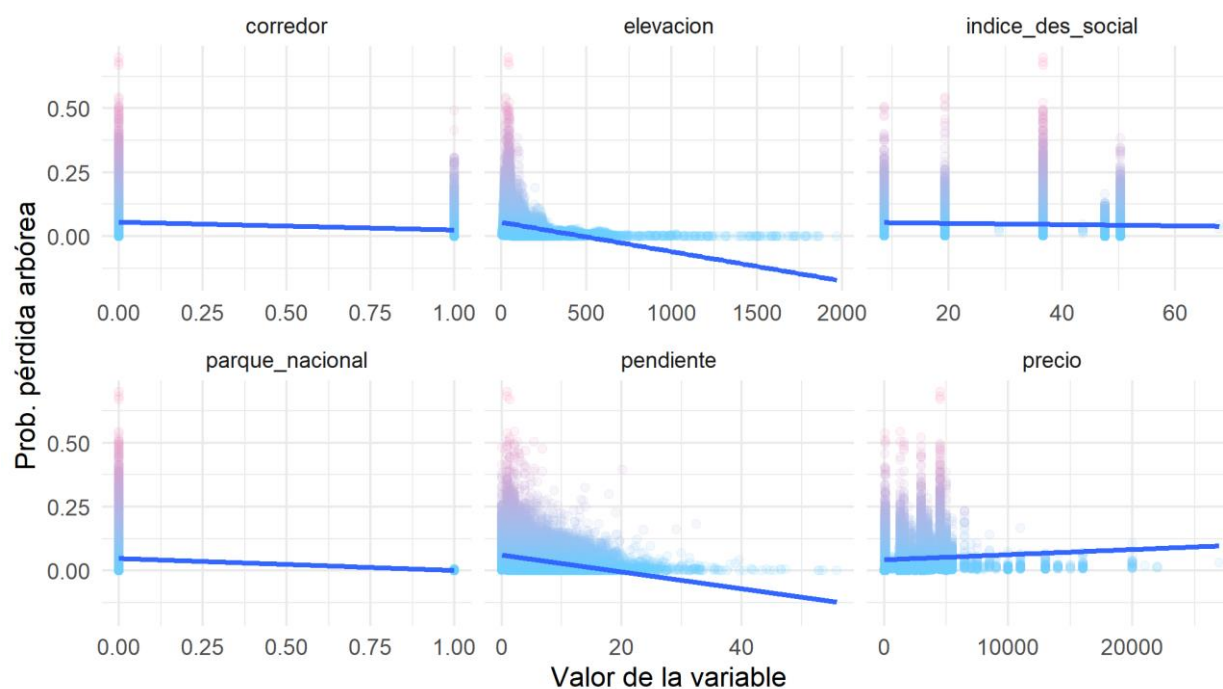
### Características generales de las zonas propensas a perder su cobertura arbórea en los próximos cinco años

En el apartado anterior se describieron las variables que mayores contribuciones<sup>47</sup> aportan a la predicción del modelo de aprendizaje automático. Por las variables utilizadas y la metodología seguida, la mayoría de las variables más importantes son aquellas que describen el comportamiento y características de la cobertura arbórea en las cercanías de cada unidad de estudio.

Ahora bien, empleando un enfoque bivariado y a partir de las predicciones obtenidas<sup>48</sup>, se graficó la distribución de variables que fueron utilizadas en el modelo y otras adicionales que no fueron utilizadas debido a limitaciones temporales en la información. Al analizar estas distribuciones es posible caracterizar y diferenciar las zonas según la probabilidad de perder su cobertura arbórea contra alguna variable específica. En las imágenes siguientes se presenta en un celeste la recta de mejor ajuste que permite identificar asociaciones lineales.

Gráficos 22

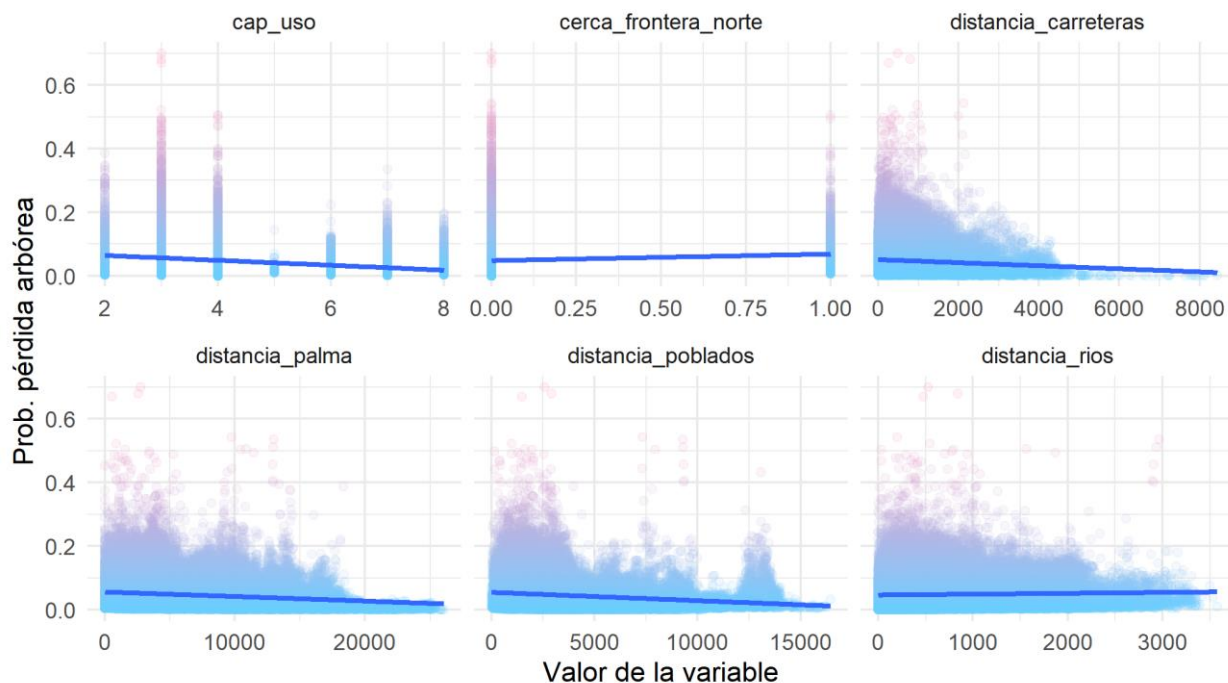
#### Distribución de variables respecto a la probabilidad de pérdida futura I<sup>49</sup>



Fuente: Elaboración propia.

Gráficos 23

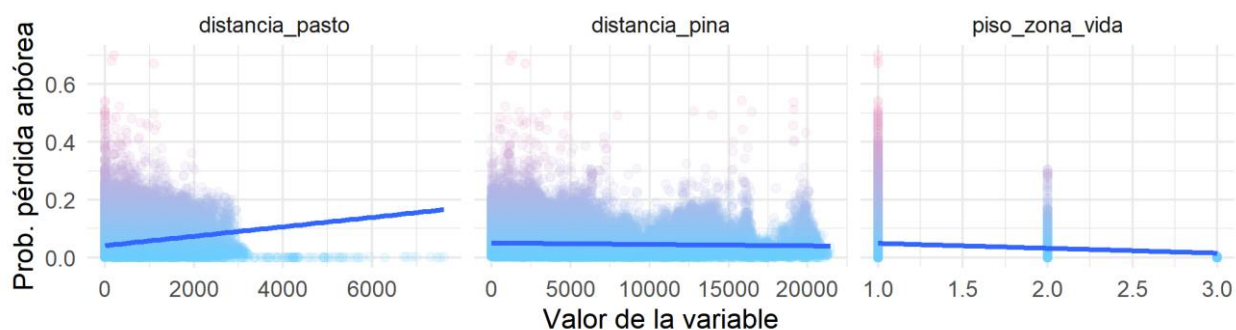
**Distribución de variables respecto a la probabilidad de pérdida futura II<sup>50</sup>**



Fuente: Elaboración propia.

Gráficos 24

**Distribución de variables respecto a la probabilidad de pérdida futura III**



Fuente: Elaboración propia.

Con base en el análisis de los gráficos anteriores se establecen las siguientes conclusiones:

- Aquellas áreas que se encuentran dentro de un parque nacional o un corredor biológico están asociadas a una probabilidad de conservar su cobertura actual mayor que las áreas fuera de ellos.

- Pendientes y elevaciones mayores están asociadas a la conservación de la cobertura arbórea y viceversa.
- Los distritos con un mayor índice de desarrollo social<sup>51</sup> tienen una leve asociación a una menor probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.
- En general, precios inferiores a los 5.000 colones por metro cuadrado son aquellos que presentan una mayor probabilidad a perder su cobertura arbórea.
- Las clases de capacidad de uso de la tierra que son favorables para el desarrollo agropecuario están asociadas a una probabilidad mayor de perder su cobertura arbórea y viceversa.
- Encontrarse a menos de 500 m de la frontera está asociada levemente a una mayor probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.
- La cercanía a los cultivos de piña y palma está asociado a una pérdida de cobertura arbórea, es decir, cuánto más lejos esté un área de estas fronteras agrícola, menor es la probabilidad de perder su cobertura actual.
- Áreas cercanas más accesibles por vía terrestre -cercanas a las carreteras- están asociados a una mayor pérdida futura que otras áreas más alejadas.
- Si bien no hay una relación lineal positiva entre la distancia a pastos y la probabilidad de pérdida, es evidente que existe una concentración de altas probabilidades de pérdida para aquellas áreas ubicadas a menos de 3 kilómetros de pasturas en relación con otros más alejados.
- En general, existe una asociación positiva entre la distancia a los ríos y la probabilidad a perder su cobertura arbórea. A pesar de ello si se analiza en detalle mediante una relación no lineal, es evidente que las áreas más cercanas a los ríos tienen una menor probabilidad de pérdida arbórea que aquellos más alejados.
- Los pisos más altos de las zonas de vida<sup>52</sup> están asociados a una menor probabilidad de pérdida, consecuentemente los pisos más bajos ubicados en las partes bajas del paisaje están relacionados con una mayor pérdida de cobertura arbórea.

A nivel general se puede concluir que las zonas con una mayor presión a perder su cobertura arbórea en los próximos cinco años se caracterizan por ubicarse en zonas en donde la tierra tiene características que la hacen apta para desarrollar otras actividades agropecuarias tales como la capacidad de uso, pendientes bajas y cercanía de otros cultivos como la piña y palma.

Este hallazgo concuerda con lo identificado por Sierra et al (2016) en donde el factor directo al cambio de cobertura en Costa Rica es el pastoreo y la agricultura. Estas zonas también se encuentran en regiones con precios más bajos y tienden a tener un índice de desarrollo más bajo que los otros distritos.

En caso contrario, las áreas que se encuentran dentro de áreas protegidas y corredores biológicos están asociadas a una conservación de su cobertura actual. Tal caracterización demuestra una asociación positiva en concordancia con estudios pasados (Robalino & Villalobos, 2014) (Morera, Sandoval, & Alfaro, 2021). En términos topográficos estas zonas se ubican en pisos altitudinales de las zonas de vida mayores y pendientes y elevaciones más elevadas.

## **Principales objetos de política pública para la reducción de la pérdida de cobertura arbórea**

Los bosques y zonas con una alta cobertura arbórea aportan una multitud de beneficios a la sociedad. Albergan la mayoría de la biodiversidad mundial, brindan medios de subsistencia, tienen un papel preponderante en la mitigación y adaptación al cambio climático, brindan agua a las comunidades solo para listar algunos de los servicios que ofrecen.

En consecuencia, detener la degradación boscosa, la pérdida de cobertura arbórea, y promover su restauración es vital para proteger la biodiversidad, estabilizar el clima, reducir la carga de gases de efecto invernadero, apoyar medios de vida y contribuir con el desarrollo sostenible.

Si bien es cierto muchas de las pérdidas de dosel arbóreo ocurren de manera aislada y dispersa hay otras que siguen patrones basados en pérdidas arbóreas pasadas y pueden predecirse. Esta condición fue aprovechada por esta investigación abriendo una gama de oportunidades para adelantarse a los eventos y ejecutar acciones proactivas, brindando un marco para priorizar y cuantificar el impacto de estrategias diversas.

La probabilidad de que un área pierda su cobertura arbórea en el futuro es una herramienta transversal valiosa para las iniciativas y políticas públicas relacionadas con el medio ambiente.

Bajo en un enfoque de priorización de recursos, las predicciones pueden utilizarse en conjunción con un servicio ecosistémico de interés como por ejemplo la recarga hídrica para enfocarse en las áreas de mayor riesgo. Adicionalmente esta herramienta aporta una predicción a cinco años que facilita la definición de objetivos en el corto plazo y permite evaluar de manera preliminar el impacto de políticas y proyectos en comparación con escenarios futuros.

En aras de resguardar la cobertura arbórea y los servicios ecosistémicos que brindan, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Las Áreas Silvestres Protegidas (ASP) juegan un papel fundamental en la protección de la pérdida de cobertura arbórea. La mayoría de las áreas dentro de un ASP tienen una menor probabilidad de ser deforestada y por ende se debe incentivar su protección y ampliación. Las Áreas Silvestres Protegidas Barra del Colorado, Maquenque y el Corredor Fronterizo tienen sectores con altas probabilidades de ser deforestadas y por ende deben ser prioritarias en el cantón.
- Puesto que las zonas con mayor riesgo generalmente se ubican en terrenos privados, los esquemas de incentivos para su protección como el pago por servicios ambientales se vuelven especialmente relevantes. En un marco de descarbonización y en momento histórico en donde parte del financiamiento de estos proyectos -impuesto a los hidrocarburos- es bajo y seguirá en decrecimiento, es pertinente enfocar los recursos en zonas con las mayores probabilidades de perder su cobertura arbórea para obtener un mayor retorno de la inversión.
- La baja calidad y densidad de bosques -alto fraccionamiento- contribuyen a la pérdida de cobertura arbórea. Esta condición refuerza la importancia de que los programas de



corredores biológicos sean fortalecidos para mejorar la conectividad y así reducir factores que contribuyen a la pérdida de dosel arbóreo.

- Las áreas más cercanas a los ríos y quebradas tienen una menor probabilidad de perder su cobertura arbórea en el futuro. Las zonas de protección definidas por la Ley Forestal No. 7575 y su aplicación son relevantes para mantener los recursos forestales y su conectividad. Es recomendable ubicar claramente tales zonas en todo el país siguiendo mecanismos estandarizados como la “Metodología para la delimitación digital de las áreas de protección de ríos, quebradas y arroyos” (INVU, PNUD, 2020) y generar herramientas actualizadas de monitoreo con un enfoque en las áreas con alta probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.
- Las áreas que se encuentran en las cercanías de cultivos extensivos como la palma, piña y banano se encuentran amenazadas producto de una expansión de la frontera agrícola. Se recomienda la aplicación de herramientas novedosas como el “Monitoreo de Cambio de Uso en Paisajes Productivos” (MINAE, Registro Nacional, CENAT, PNUD., s.f.) que permitan identificar esta expansión y ejecutar acciones concretas de manera ágil.
- Puesto que las áreas boscosas son una medida de adaptación basada en la naturaleza que aminoran los efectos negativos de los eventos hidrometeorológicos extremos. Es recomendable crear mecanismos de protección para aquellas áreas con mayores probabilidades de pérdida de cobertura arbórea en zonas estratégicas de protección a las comunidades.
- Por tener un enfoque predictivo, estos resultados son valiosos para realizar estrategias para que reduzcan los impactos negativos de la reducción en la cobertura arbórea. Relacionar información geográfica como la recientemente creada “Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana” (Biodiver\_City San José, 2021) permitirá contar con cuantificaciones de impactos -fijación de carbono, pérdida de conectividad, entre otros- que facilitará la priorización de recursos basados en su impacto.
- Proyectos financieros que velen por la conservación como la Tarifa de Protección del Recurso Hídrico impulsada por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, Banca Verde, entre otros podrían considerar estos resultados como parte de los criterios para la eficiente asignación de recursos.
- Puesto que las zonas con cobertura arbórea actual compiten por diversas actividades productivas, es relevante dotar a las comunidades de conocimientos y herramientas para aumentar la productividad actual y desarrollar modelos de producción sostenible que eviten la disminución de zonas boscosas y promuevan su incorporación en el sistema productivo. Apertura de mercados e incentivos para producciones verdes reducirían presión sobre los recursos forestales.

## **Anexo metodológico**

En este apartado se describirá el procedimiento realizado para entrenar, validar, probar y aplicar un algoritmo de aprendizaje automático supervisado que predice la pérdida de cobertura arbórea durante los años 2021 a 2025 en Costa Rica mediante la identificación de relaciones multivariadas complejas.

Este proceso inició con la obtención y análisis de fuentes de información de acceso público y la creación de variables por parte del autor mediante un procedimiento conocido como ingeniería de variables. Seguidamente, por tratarse de un problema de índole espacial y temporal, se dividió el set de datos en cuatro periodos de análisis para entrenar, validar, probar el modelo y una última para realizar la predicción. Con estas particiones se especificó la estructura del algoritmo y el procedimiento utilizado para elegir el modelo que maximizó la métrica de interés en los conjuntos de validación. El modelo seleccionado fue puesto a prueba con datos no utilizados en el proceso de entrenamiento y validación para estimar los resultados que podría obtener en el periodo 2021-2025.

Finalmente, para favorecer su aplicación práctica, se generó una representación de los resultados en formato ráster en donde se muestran las probabilidades de las zonas a perder su cobertura arbórea en los próximos 5 años.

Todos estos procedimientos fueron realizados en el lenguaje y entorno de programación *R* (R Core Team, 2020) y *Python* (Van Rossum & Drake, 2009), haciendo uso principalmente de las librerías *lightgbm* (Ke, Soukhavong, & Lamb, 2020), *shap* (Lundberg & Lee, 2017), *tidymodels* (Kuhn & Wickham, 2020), *tidyverse* (Wickham, y otros, 2019), *sf* (Pebesma, 2018) y *raster* (Hijmans, 2020).

## **Fuentes de información**

En los siguientes subapartados se describirán las fuentes de información que son geográficamente explícitas y, por ende, representan polígonos, líneas o puntos en un espacio cartográfico.

### ***Base de datos Global Forest Change (GFC)***

Corresponde a la base de datos más importante de la investigación puesto que incluye la variable a predecir -pérdida o no pérdida de cobertura arbórea- y el comportamiento de tal variable en el tiempo. Esta información publicada por primera vez en el 2013 (Hansen, y otros, 2013) tiene un formato ráster, cuenta con tres bandas principales que se basan en imágenes satelitales y tienen una resolución de 30x30 m. Luego de su primera publicación, la base de datos es actualizada anualmente por la organización Global Forest Change (Universidad de Maryland, Global Forest Change, 2021).

### **Información principal**

La base de datos tiene un total de 13 bandas que incluyen información relativa a la cobertura y pérdida en la cobertura arbórea, así como composiciones de imágenes satelitales. Las 3 bandas que se utilizaron en este trabajo son las siguientes:

### **Cobertura arbórea en el año 2000**

Teóricamente, la cobertura arbórea corresponde al porcentaje de vegetación con una altura mayor a 5m de altura en un píxel de 30 x 30 m en el año 2000. Es decir, no incluye cultivos de baja altura como piña, hortalizas, arroz, entre otros. Pero si puede contemplar sembradíos que cumplan esa característica como cultivos de palma maduros y teca. En este trabajo se considera que un píxel cuenta con cobertura arbórea si el píxel tenía un porcentaje de cobertura arbórea igual o mayor al 30% en el año 2000.

El año 2000 es el único año que cuenta con esta información y se considera como la línea base.

### **Pérdida de cobertura arbórea**

Corresponde a la pérdida total de cobertura arbórea en un área de 30 x 30 m. Se debe tomar en cuenta que esta pérdida puede ser causada por fenómenos naturales o antropogénicos. Estos procesos pueden incluir degradación, deforestación, incendios, deslizamientos y corta de cultivos. En este trabajo se define esta pérdida como pérdida de cobertura arbórea.

Una vez que se identifica una pérdida, esa área queda marcada como pérdida, aunque posteriormente fuese reforestada.

### **Año de pérdida**

Año en que se registró la primera pérdida de cobertura arbórea. Los años que incluye la base de dato a la fecha de esta publicación van desde el 2001 hasta el 2020.

### **Características de la base de datos**

Esta información cuenta con varias características que la diferencian de otras bases de datos de cambio en la cobertura:

### **Libre acceso y transparencia**

La información es gratuita, además la metodología y medidas de exactitud están disponibles para análisis de terceros. Es posible descargar esta información desde varios medios. Para este trabajo se utilizó la versión 1.8 2020 producida por la Universidad de Maryland (Universidad de Maryland, Global Forest Change, 2021).

### **Comparabilidad**

La metodología aplicada no depende de fronteras administrativas. Esto permite hacer comparaciones entre áreas que anteriormente no podían cotejarse, ya que utilizaban diferentes definiciones de bosque o había dudas acerca su veracidad.

### **Complejidad**

Por temas presupuestarios, normalmente estos estudios se concentran en áreas específicas, sin embargo, esta información está disponible prácticamente a nivel global. Esta característica hace que sea posible replicar esta metodología en otras partes del mundo.

### **Resolución**

La resolución de estas imágenes es de 30 x 30 m por píxel lo que hace posible detectar cambios en la cobertura de la tierra con un gran nivel de detalle en comparación con otras bases de datos de escala mundial.

### **Limitaciones**

El algoritmo de clasificación ha sido modificado en cuanto a la información de entrenamiento y ha sido mejorado en los periodos posteriores al 2012. Por ende, esto puede resultar en inconsistencias entre periodos

La captura de imágenes satelitales se ha realizado con diferentes tecnologías y la cantidad de información recopilada ha variado durante los periodos de estudio.

### **Exactitud**

Todo análisis de esta naturaleza tiene una incertidumbre asociada. Esto puede ocurrir tanto por la metodología como por la calidad y resolución de los datos base.

Los autores de esta base de datos han publicado dos estudios respecto a su exactitud – Hansen y otros, 2013 y Tyukavina y otros, 2015-. La publicación original clasificó un total de 1500 bloques de 120 m de lado a partir de imágenes Landsat, MODIS y Google Earth para compararlas con los mapas de pérdida y ganancia globales. El segundo estudio se enfocó en los trópicos y utilizó 3.000 puntos de control con la misma resolución que la base de datos.

El Cuadro 4 muestra la exactitud encontrada en estos estudios:

Cuadro 4

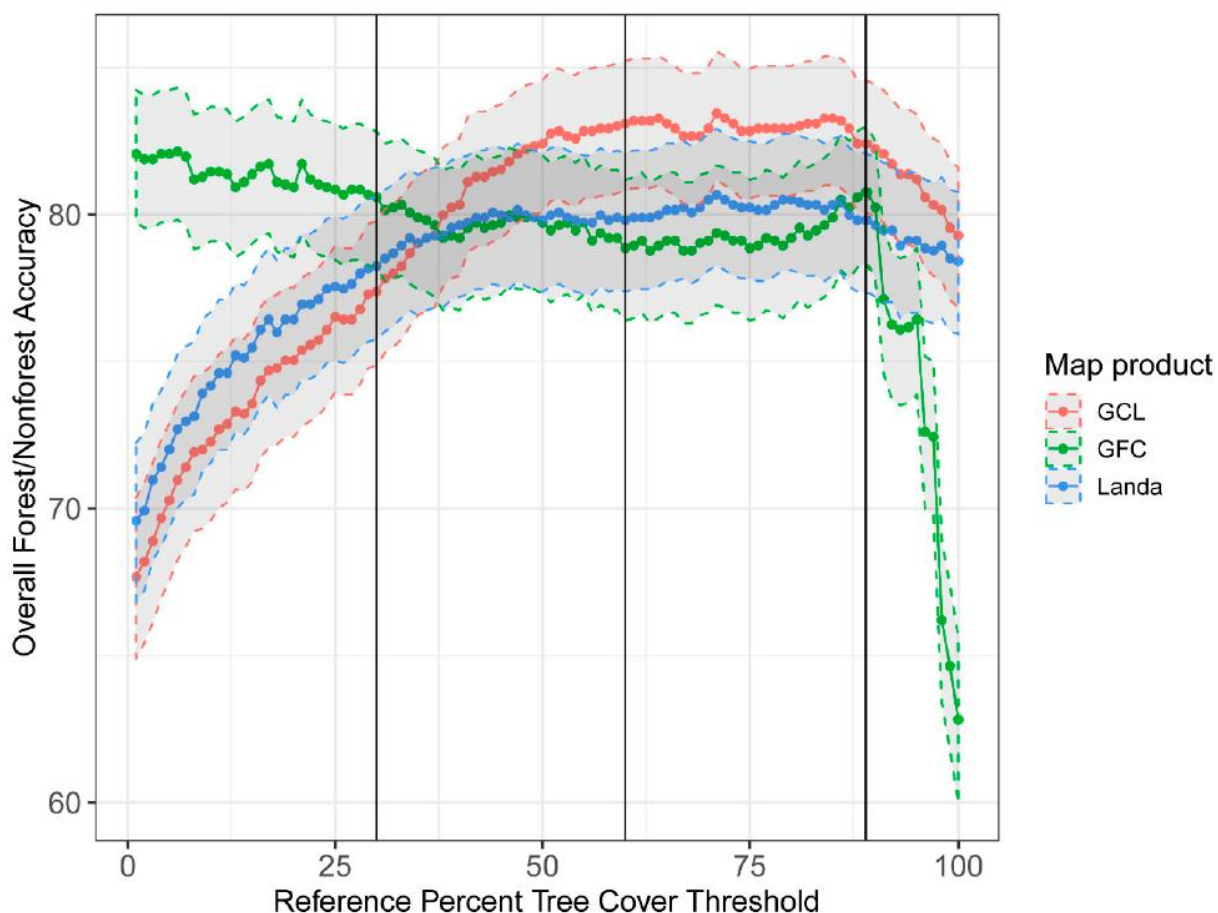
#### **Exactitud de la base de datos**

| <b>Estudio</b>         | <b>Bioma/zona</b> | <b>Falsos positivos</b> | <b>Falsos negativos</b> |
|------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Hansen, 2013</b>    | Tropical          | 13%                     | 16,9%                   |
| <b>Tyukavina, 2015</b> | Latinoamérica     | 4%                      | 17%                     |

Recientemente Cunningham et al (Cunningham, Cunningham, & Fagan, 2019) analizaron la exactitud de la clasificación de bosque o no-bosque de esta y otras 2 bases de datos, según el umbral del porcentaje de cobertura arbórea en Costa Rica. Los resultados obtenidos para la base de datos del GFC son alentadores en el sentido que son comparables con productos realizados a nivel nacional y global para ciertos umbrales. Siguiendo los resultados de ese estudio, en la investigación se clasificó como un píxel con cobertura arbórea o cobertura arbórea, aquel píxel que tiene una cobertura arbórea superior al 30%. La exactitud encontrada por los autores para esta condición es cercana al 80% y es la mejor de las tres bases de datos analizadas para este umbral (gráfico 25).

Gráfico 25

**Exactitud de las bases de datos según el porcentaje de cobertura para discernir entre bosque y no bosque**



Fuente: (Cunningham, Cunningham, & Fagan, 2019)<sup>53</sup>.

Se debe tomar en cuenta que tanto esta como las otras dos bases de datos clasifican erróneamente algunos campos agrícolas como bosques. Particularmente la base de datos de GFC confunde cultivos en hileras y perennes como bananos, palma aceitera y café con bosques. Por ende, se debe ser consciente que esta información incluye sesgos de clasificación y debe usarse con cautela si se desea referirse como cobertura boscosa.

**Otras capas de información**

A continuación, se describen las otras fuentes de información utilizadas como insumo para el modelo de aprendizaje automático supervisado.

Cuadro 5

**Fuentes de información del estudio**

| Capa             | Descripción                                       | Formato | Fuente | Año  |
|------------------|---|---------|--------|------|
| <b>Elevación</b> | Modelo de elevación digital con resolución 30x30m | Ráster  | NASA   | 2007 |

|                                    |   |            |                              |                         |
|------------------------------------|---|------------|------------------------------|-------------------------|
| <b>Pendiente</b>                   | Pendiente del terreno basado en la elevación                          | Ráster     | NASA                         | 2007                    |
| <b>Calles y carreteras</b>         | Ubicación de calles y carreteras                                      | Polilíneas | Open Street Map              | 2021                    |
| <b>Poblados</b>                    | Ubicación de centros de poblados                                      | Puntos     | Atlas Digital CR2004         | 2004                    |
| <b>Áreas Silvestres Protegidas</b> | Ubicación de áreas que están protegidas por el estado.                | Polígonos  | SINAC                        | 2020                    |
| <b>Corredores Biológicos</b>       | Ubicación de corredores biológicos.                                   | Polígonos  | SINAC                        | 2020                    |
| <b>Capacidad de Uso del Suelo</b>  | Capacidad natural de la tierra para soportar distintas formas de uso. | Polígonos  | Fundación Neotrópica         | 1995                    |
| <b>Precio</b>                      | Valor por metro cuadrado de zonas homogéneas.                         | Polígonos  | ONT / Ministerio de Hacienda | 2014                    |
| <b>Índice de Desarrollo Social</b> | Índice de desarrollo social a nivel distrital por quinquenio          | Polígonos  | INEC y MIDEPLAN              | 2001, 2007, 2013 y 2017 |
| <b>Biotemperatura</b>              | Biotemperatura media anual de la zona de vida                         | Polígonos  | Centro Científico Tropical   | 2004                    |
| <b>Precipitación</b>               | Precipitación media anual de la zona de vida                          | Polígonos  | Centro Científico Tropical   | 2004                    |
| <b>Piso</b>                        | Piso altitudinal de la zona de vida                                   | Polígonos  | Centro Científico Tropical   | 2004                    |
| <b>Ríos</b>                        | Delimitación de cauces de agua a escala 1:50.000                      | Polilíneas | Atlas Digital CR2004         | 2007                    |

### Ingeniería de variables

Se realizaron diferentes modificaciones a las capas antes descritas para ajustarlas y crear variables que fueron de utilidad en el proceso de clasificación.

#### Transformaciones básicas

La unidad de análisis de este trabajo es el píxel o área de terreno de 30 x 30 m. En concordancia, las variables a utilizar deben tener un formato tal que pueda ser asignado a la unidad de estudio. Teniendo esto en cuenta, se transformó la información de tipo “polilínea” o “punto” por medio de cálculos basados en la proximidad. Tales operaciones se aplicaron para obtener las siguientes variables:

- Cercanía a calles y carreteras: Para cada píxel de Costa Rica, se calculó la distancia más cercana de su centroide a una carretera o calle y se creó una variable que representa la cercanía a un poblado.
- Cercanía a centros de poblados: Para cada centroide de cada píxel se calculó la distancia mínima a un poblado y se creó una variable que representa la cercanía a un poblado.
- Cercanía a ríos: Del mismo modo, se calculó la distancia mínima a un río y se creó una variable que representa la cercanía a un río.

### Operaciones con rásters

Puesto que un píxel está rodeado por otros que pueden influir en su estado futuro, se deben realizar operaciones con rásters que permitan capturar el comportamiento y estado de los vecinos. Estas operaciones son llevadas a cabo para las variables que tienen un formato ráster y que están relacionadas con la cobertura o pérdida boscosa.

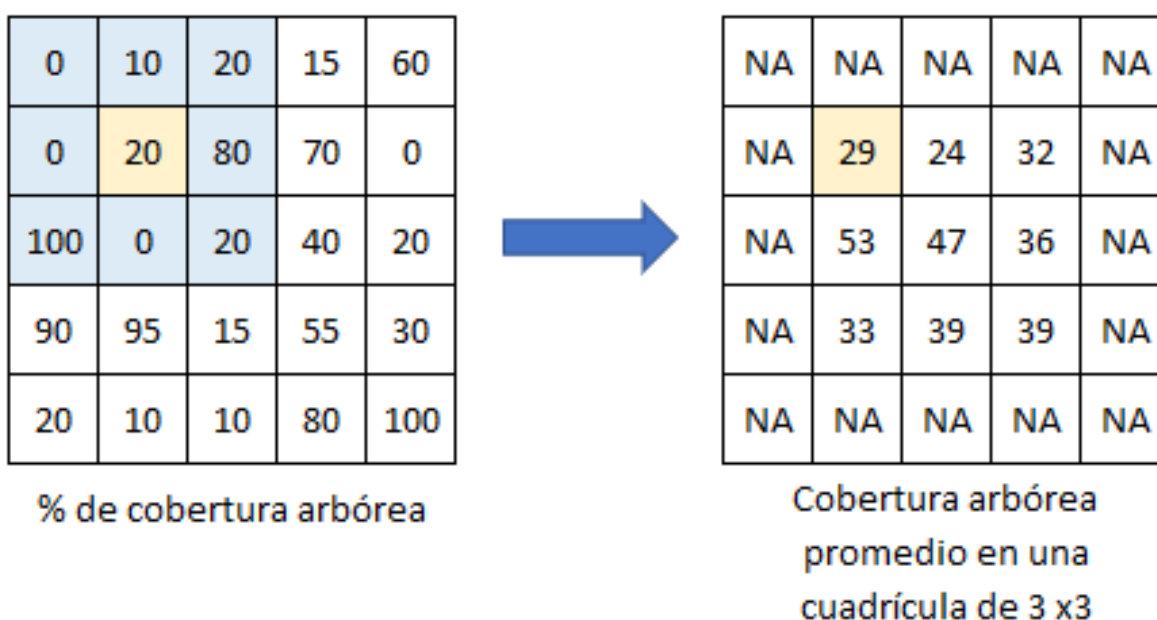
Se calcularon operaciones con rásters para cada año y en radios de influencia de 300 m, 1000 m y 3000 m para abarcar comportamientos en diferentes grados de lejanía. El cálculo aplica un peso a los píxeles basados en su cercanía al punto en cuestión, cuanto mayor sea su cercanía, mayor es el peso que recibe. En todos los casos se utilizó una distribución Gaussiana centrada en el píxel de estudio con una desviación estándar igual a un tercio de su radio de influencia.

#### 1.1.1.1 Cobertura arbórea promedio

Calcula el promedio de la cobertura arbórea de los píxeles cercanos al píxel en estudio. Esta variable junto con “cantidad de cobertura arbórea” representan la salud de las áreas con cobertura y da información respecto al porcentaje de cobertura arbórea de los píxeles que la pierden.

Figura 1

#### Representación de operación de cobertura arbórea promedio con pesos uniformes

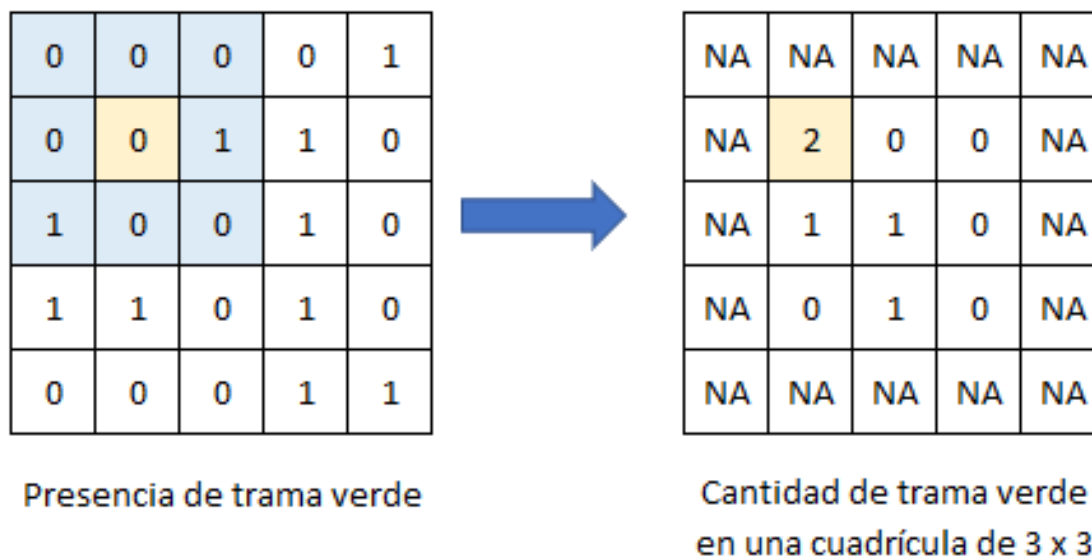


#### Cantidad de cobertura arbórea

Suma la cantidad de unidades mayores o iguales al 30% de cobertura arbórea que se encuentran en su proximidad. Esta variable puede ser un indicador del fraccionamiento de la cobertura arbórea y es la base para determinar el avance de la pérdida cada año.

Figura 2

**Representación de operación de cantidad arbórea promedio con pesos uniformes**



Es importante indicar que estas variables no solamente aportan información por sí solas si no que interactúan entre sí, se complementan y permiten una caracterización apropiada del problema de pérdida de la cobertura arbórea.

Para la aplicación de tales cálculos, se realizó un búfer alrededor del área de estudio -incluye información en Nicaragua y Panamá- para calcular las operaciones con rásters en todas las celdas dentro de cada región sin tener valores faltantes -NA en las figuras-. Adicionalmente se realizaron correcciones en las celdas en las que los radios de influencia se ubicaban en territorio marítimo.

*Temporales*

Para cada una de las variables descritas en el apartado “operaciones con rásters” se calculó el cambio en el tiempo dentro de cada periodo de estudio -5 años-. La variación temporal es representada como la pendiente de la recta de mejor ajuste –  $\beta_1$  -entre la variable en estudio y los años:

$$\text{Variable en estudio} = \beta_0 + \beta_1 * \text{años}$$

Adicionalmente se calculó la diferencia entre el valor inicial y final del periodo en estudio para contabilizar el cambio en la magnitud de la variable.



## Periodos de estudio y conjuntos de datos

Puesto que el análisis es de carácter temporal, se agrupó la información disponible en periodos. Los periodos de estudio se ajustan a la información disponible del GFC cuya pérdida arbórea fue registrada durante el 2001-2020.

Para la realización de este análisis fue necesario contar con cuatro conjuntos de datos que funcionan como entrenamiento, validación, prueba y predicción. Considerando este requerimiento y los años disponibles en la base de datos, la información fue dividida en cuatro periodos de cinco años cada uno.

En el *Cuadro 6* se muestran las características más importantes de estas agrupaciones:

Cuadro 6

### Definición de periodos de estudio

| Conjunto/Periodo | Función                     | Variables   | Etiqueta pérdida de cobertura arbórea |
|------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------------|
| <b>1</b>         | Entrenamiento<br>validación | - 2001-2005 | 2010                                  |
| <b>2</b>         | Entrenamiento<br>validación | - 2006-2010 | 2015                                  |
| <b>3</b>         | Prueba o testeo             | 2011-2015   | 2020                                  |
| <b>4</b>         | Predicción                  | 2015-2020   | Variable a predecir -2025-            |

El algoritmo de aprendizaje automático se entrenó, validó, probó y se aplicó en cada una de las cinco regiones hidrológicas del país - Caribe, Pacífico Central, Pacífico Norte, Pacífico Sur y Zona Norte- para obtener estadísticas desagregadas y facilitar el procesamiento computacional.

Mapa 24

**Regiones en las que se aplicaron los modelos de aprendizaje automático**



**Algoritmo predictivo**

Se utilizó un ensamble de aprendizaje automático de tipo “boosting”. Este tipo de ensambles entrenan de manera secuencial múltiples algoritmos con un alto grado de sesgo y poca varianza. En cada iteración el algoritmo se concentra en las observaciones que fueron más difíciles de clasificar en la iteración anterior lo que permite reducir el sesgo de los algoritmos individuales. Específicamente se utilizó el algoritmo desarrollado por Microsoft en el 2017 denominado Light Gradient Boosting Machine (Ke, Soukhavong, & Lamb, 2020) conocido popularmente como *LightGBM*. Este algoritmo es un ensamble de tipo *boosting* que consiste en la aplicación de gradientes descendientes en árboles de decisión.

**Modelado**

Una gran parte del proceso de inteligencia artificial consiste en encontrar un modelo con los hiperparámetros adecuados que generen un balance óptimo entre el sesgo y la varianza, maximizando una función objetivo y a la vez evitando el sobreajuste a los datos de

entrenamiento. De acuerdo con lo anterior, se entrenó el modelo con datos de un periodo y se validó con otro para evitar el uso de datos pertenecientes a más de un período que favorecieran un sobreajuste. El procedimiento consistió en aplicar un conjunto de combinaciones de hiperparámetros y entrenar el modelo con el “Conjunto 1”, validarlo con el “Conjunto 2” y viceversa. La métrica utilizada para determinar el mejor modelo fue el área bajo la curva *Receiver Operation Characteristic* (ROC-AUC) apropiada para algoritmos de clasificación desbalanceados (Haibo & Yunquian, 2013).

Luego de realizar varias iteraciones que buscan en el espacio de hiperparámetros la mejor combinación, se seleccionó el modelo con los mejores resultados en el conjunto de validación.

Los hiperparámetros optimizados fueron los siguientes:

- *mtry*: El número de predictores que serán aleatoriamente seleccionados en cada partición cuando se crea un modelo de árbol.
- *trees*: El número de árboles contenidos en el ensamble.
- *min\_n*: La cantidad mínima de observaciones en un nodo que son requeridos para dividir el nodo una vez más.
- *tree\_depth*: Profundidad máxima del árbol.
- *learn\_rate*: La tasa a la que el algoritmo de boosting se adapta tras cada iteración.
- *loss\_reduction*: La reducción en la función de pérdida para dividir el nodo una vez más.
- *sample\_size*: Cantidad de datos expuestos a la rutina de entrenamiento.

Una vez obtenidos los hiperparámetros óptimos, el algoritmo se entrenó con el Conjunto 1 y 2, posteriormente se aplicó en el Conjunto 3 para conocer los resultados considerando datos nunca vistos por el modelo. Finalmente, el modelo se entrenó con todos los datos disponibles para predecir la pérdida de cobertura arbórea entre el año 2021 y el 2025.

### Características de los datos

En el año 2000 en Costa Rica, el área con cobertura arbórea era de 39.174 km<sup>2</sup>, esto equivale a 435 millones de píxeles de 30 x 30 m. Conforme pasan los años y la cobertura arbórea inicial se reduce -recordar que el análisis no considera la regeneración de cobertura arbórea- la cantidad píxeles disminuye, consecuentemente cada conjunto de entrenamiento tiene menores observaciones conforme pasan los años.

Por otro lado, los píxeles que experimentan una pérdida de cobertura arbórea son muy inferiores al total de píxeles con cobertura arbórea. En el Cuadro 7 se muestran los píxeles utilizados en cada periodo:

Cuadro 7

#### Observaciones por período

| Periodo  | Total píxeles | Píxeles con pérdida | Porcentaje |
|----------|---------------|---------------------|------------|
| <b>1</b> | 42.824.827    | 876.308             | 2.0%       |
| <b>2</b> | 41.948.519    | 476.884             | 1.1%       |

|   |            |         |      |
|---|------------|---------|------|
| 3 | 41.471.635 | 756.175 | 1.8% |
| 4 | 40.715.460 | NA      | NA   |

### **Variables utilizadas**

Cada uno de los píxeles en el set de datos tiene asociado un total de 41 características. Esto hace que para cada periodo de análisis la cantidad de datos sea de aproximadamente 1.711 millones para un total de 6.845 millones en todos los periodos. Las 41 variables se describen a continuación:

- label: Indica si el píxel experimentará pérdida de cobertura arbórea en los próximos 5 años. Variable binaria.
- period: Indica el periodo correspondiente al set de datos. Variable numérica.
- x, y: Coordenadas geográficas CRTM05. Variable numérica no usada en el modelo.
- tree\_cover: Porcentaje de cobertura arbórea en el año 2000. Variable numérica.
- slope: Pendiente del terreno. Variable numérica.
- dem: Elevación del terreno. Variable numérica.
- asp: Indica la categoría del Área Silvestre Protegida. Variable numérica.
- corredor: Variable binaria que indica la presencia de un corredor biológico. Variable binaria.
- ids: Índice de desarrollo social distrital. Variable numérica.
- precio: Precio por metro cuadrado por zona homogénea. Variable numérica.
- precip: Promedio de precipitación anual según zona de vida en mm. Variable numérica.
- piso: Piso de la zona de vida: basal, premontano, montano bajo, montano, subalpino. Enumerados del 1 al 5. Variable numérica.
- biotemp: Biotemperatura de la zona de vida en grados centígrados. Variable numérica.
- cap\_uso: Capacidad de uso del suelo. Variable numérica.
- calle\_dist: Distancia más corta del píxel a una calle en metros. Variable numérica.
- poblados\_dist: Distancia más corta del píxel a un poblado en metros. Variable numérica.
- rivers\_dist: Distancia más corta del píxel a un río en metros. Variable numérica.
- x\_centroid: Indica la ubicación general de un píxel en las coordenadas “x” de acuerdo con su ubicación en una grilla de 6 x 6 aplicada sobre Costa Rica. Variable numérica.
- y\_centroid: Indica la ubicación general de un píxel en las coordenadas “y” de acuerdo con su ubicación en una grilla de 6 x 6 aplicada sobre Costa Rica. Variable numérica.
- nicaragua: Indica si el píxel se encuentra a menos de 500m de la frontera con Nicaragua. Variable binaria.
- panama: Indica si el píxel se encuentra a menos de 500m de la frontera con Panamá. Variable binaria.
- sea: Indica si el píxel se encuentra a menos de 500m de la costa. Variable binaria.
- 3 variables tipo “mean\_forest”: Promedio de los píxeles con cobertura arbórea de cada periodo para todos los radios de cercanía.
- 3 variables tipo “mean\_cover”: Promedio de la cobertura arbórea de cada periodo para todos los radios de cercanía.

- 3 variables tipo “forest\_loss”: Pérdida boscosa durante los 5 años de cada periodo para todos los radios de cercanía.
- 3 variables del tipo “forest\_trend”: Calcula la tendencia anual de la presencia de cobertura arbórea en las cercanías del píxel. Existe una tendencia para cada uno de los 3 radios de cercanía.
- 3 variables del tipo “cover\_trend”: Calcula la tendencia anual del promedio de cobertura arbórea en las cercanías del píxel. Existe una tendencia para cada uno de los 3 radios de cercanía.
- 3 variables tipo “forest”: Conteo de celdas con cobertura arbórea superiores al 30% en las cercanías del píxel para el primer año del periodo.

### **Distribución de las variables**

A continuación, se muestran varios gráficos de caja que detallan la distribución de cada variable con respecto a su estado futuro – pérdida o no pérdida de cobertura arbórea- en los conjuntos de entrenamiento y validación.

Gráfico 26

#### **Distribución de variables I por categoría**

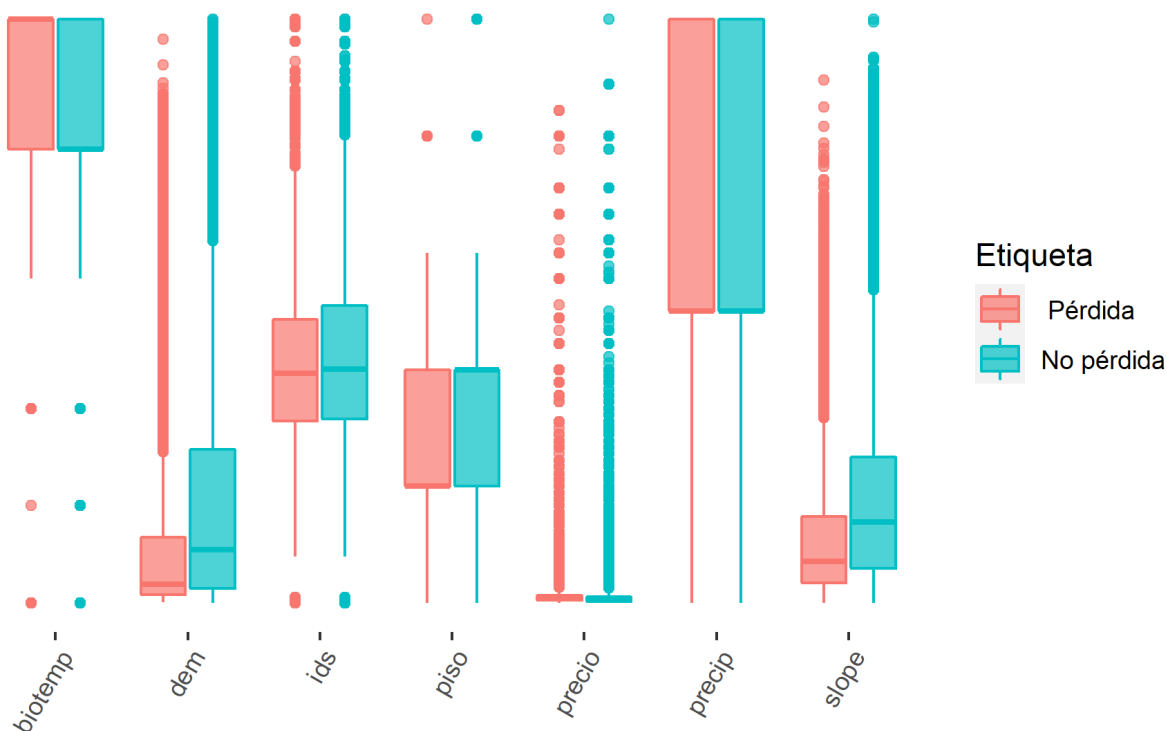


Gráfico 27  
Distribución de variables II por categoría

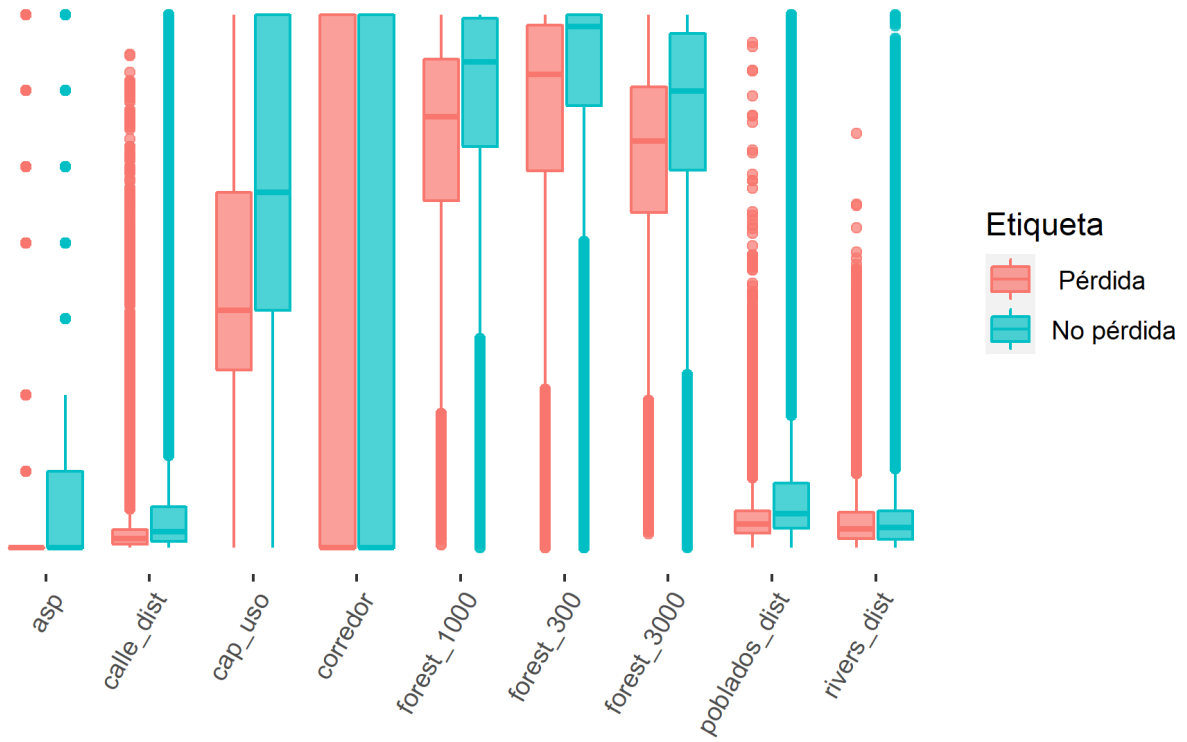


Gráfico 28

**Distribución de variables III por categoría**

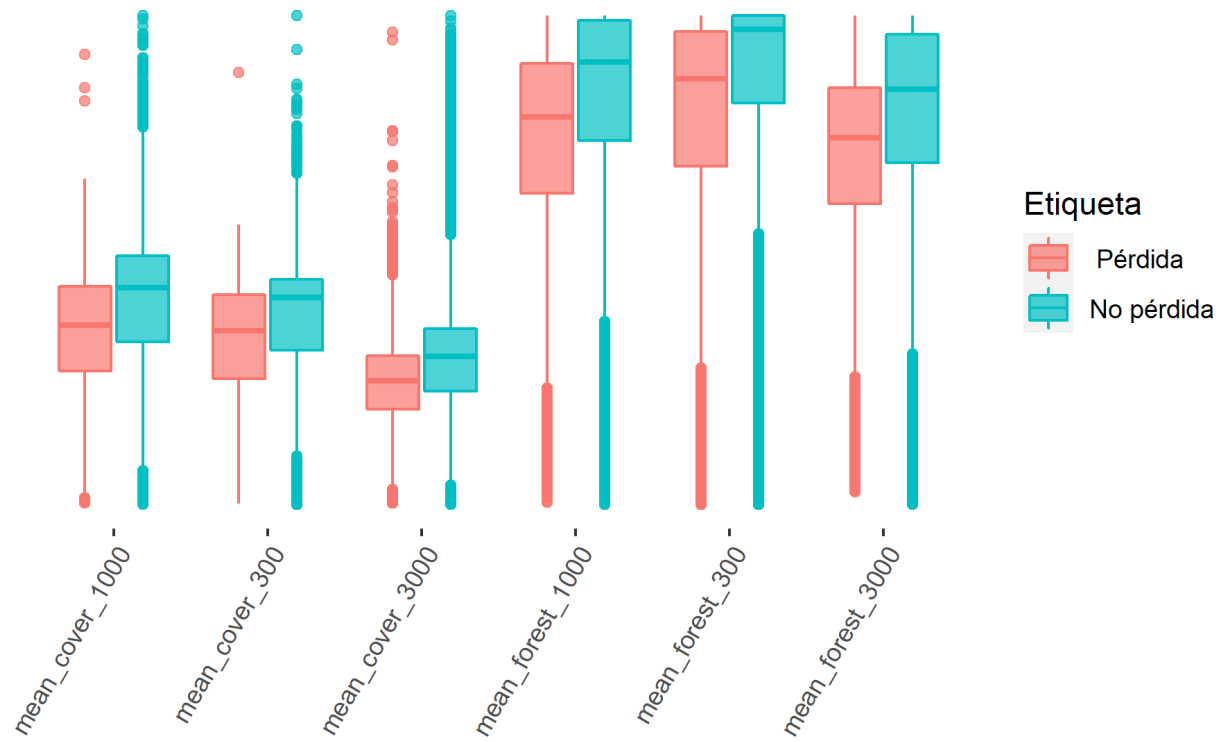
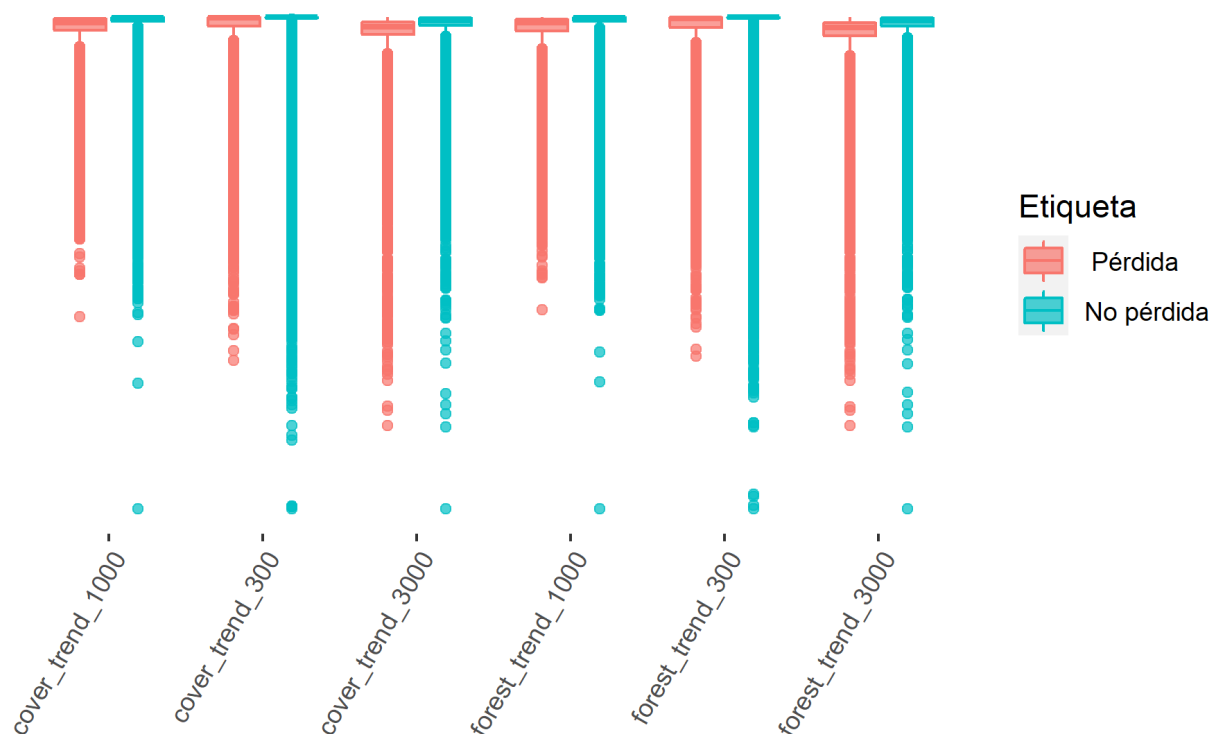


Gráfico 29

**Distribución de variables IV por categoría**



Algunas observaciones de las variables expuestas son:

- Biotemperaturas altas y los pisos altitudinales bajos de las zonas de vida están asociadas con pérdida boscosa.
- Las pendientes y elevaciones bajas son más propensas a perder su cobertura arbórea. Esto concuerda con el hecho de que los asentamientos urbanos y cultivos extensivos se localizan en zonas de baja elevación y pendiente.
- Los píxeles deforestados son más propensos a encontrarse en las cercanías de las carreteras.
- Píxeles ubicados en áreas silvestres protegidas perdieron su cobertura arbórea en menor medida que los que no se encuentran en esos regímenes de protección.
- Los píxeles que sufrieron una pérdida boscosa están en zonas con una densidad menor de cobertura arbórea -fraccionamiento- y también la calidad de esas áreas es menor -porcentaje de cobertura-.
- Los píxeles que en sus cercanías experimentaron una tasa elevada de pérdida arbórea fueron más susceptibles a perder su cobertura arbórea.

Este análisis exploratorio valida la lógica detrás de la selección y creación de variables puesto que es evidente que existe una relación entre la distribución de las variables generadas y la pérdida arbórea futura.



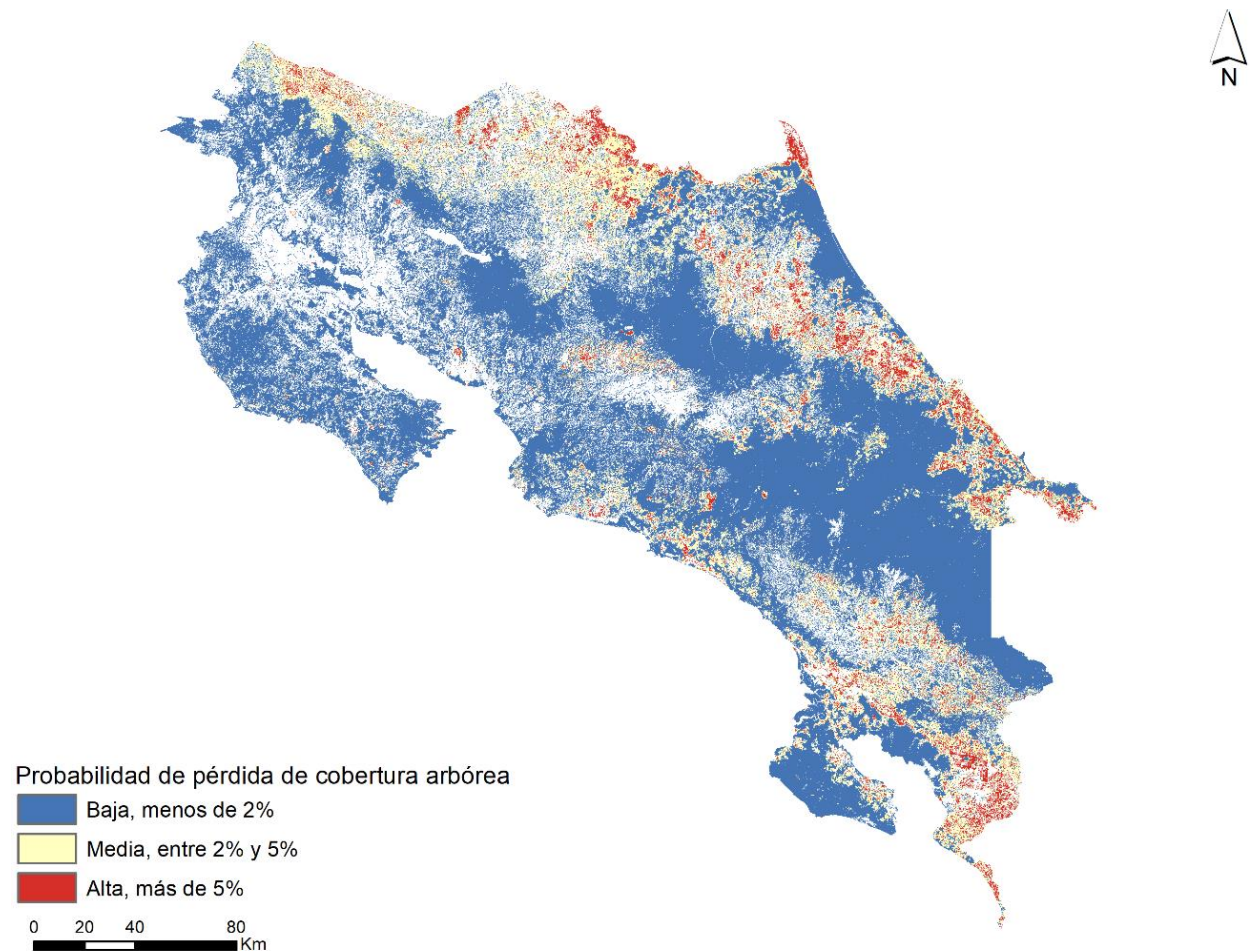
## Resultados

Luego de realizar varias iteraciones con diferentes metodologías -búsqueda de cuadrícula y optimización bayesiana- que buscan en el espacio de hiperparámetros la mejor combinación, se obtuvo el modelo con mejores resultados en el conjunto de validación.

El resultado de las predicciones de la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea durante los años 2021 al 2025 se muestra en el mapa 25.

Mapa

### Probabilidad de pérdida arbórea. 2021-2025



### **Métricas**

Para evaluar el desempeño futuro, los modelos fueron puestos a prueba con información nunca antes vista. En este caso, se probó el modelo para realizar una predicción en el periodo 2015-2020 utilizando como entrenamiento y validación periodos anteriores. Al aplicar el mejor modelo para los conjuntos de validación basados en la métrica ROC-AUC se obtuvieron los siguientes resultados para cada región:

Cuadro 8

#### **Valores de ROC-AUC para cada región en estudio**

| <b>Región</b>                          | <b>ROC-AUC</b> |
|--|----------------|
| <b>Pacífico Sur</b>                    | 0,75           |
| <b>Norte</b>                           | 0,61           |
| <b>Pacífico Norte</b>                  | 0,66           |
| <b>Pacífico Central</b>                | 0,66           |
| <b>Caribe</b>                          | 0,78           |
| <b>Costa Rica -promedio ponderado-</b> | 0,70           |

Si se considera la escala analizada, los patrones de pérdida de cobertura en el país, la baja ocurrencia del fenómeno -1,66% de pérdida cada cinco años- y la incertidumbre propia de la base de datos se concluye que los resultados fueron satisfactorios.

### **Contribución de variables**

Los modelos complejos de inteligencia artificial son difíciles de interpretar más allá de los resultados que brindan. En el año 2017, se desarrolló una metodología denominada “Shapley Additive Explanations” (Lundberg & Lee, 2017) -basada en los aportes de Lloyd Shapley en 1951- que aporta un marco que facilita el entendimiento de las predicciones del modelo.

Con esta metodología es posible cuantificar el “valor Shapley” que corresponde a la contribución marginal promedio de una variable a través de todas las posibles combinaciones de las variables. En este caso, es interesante conocer los aportes de cada una de las variables en el proceso de clasificación de que un píxel pierda su cobertura arbórea o no.

Se aplicó esta metodología para cada una de las regiones estudiadas con todas sus observaciones. Adicionalmente se caracterizaron las áreas analizadas por medio de un análisis bivariado entre 14 variables de interés y la probabilidad de pérdida futura. Los resultados se presentaron en el documento “Predicción de la pérdida de la cobertura arbórea en Costa Rica en el periodo 2021-2025”.

## Referencias

- Biodiver\_City San José. (2021). *Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana*. Obtenido de <https://www.atlasverde.org/inicio>
- Centro Científico Tropical - Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2004). *Mapa Ecológico de Costa Rica, según el sistema de clasificación de Zonas de Vida del mundo de L. R. Holdridge*.
- Cunningham, D., Cunningham, P., & Fagan, M. E. (2019). Identifying Biases in Global Tree Cover Products: A Case Study in Costa Rica. *Forests*.
- Cushman, S., Macdonald, E., Landguth, E., Malhi, Y., & Macdonald, D. (2017). *Multiple-scale prediction of forest loss risk across Borneo*. Springer, Landscape Ecology.
- FAO. (2015). *Costa Rica Case Study Prepared for FAO as part of the State of the World's Forests 2016 (SOFO)*.
- FAO. (2016). *State of the World's Forests: Forests and agriculture: land-use challenges and opportunities*. Rome.
- FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal*. Roma.
- Farr, T. R., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., . . . Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics* v. 45.
- Fundación Neotrópica - CEAP. (1995). *Cartografía de capacidad de uso de la tierra, clases forestales*. San José: Instituto Geográfico Nacional.
- Haibo, H., & Yunquian, M. (2013). *Imbalanced Learning: Foundations, algorithms and applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Hansen, M. C., Potapov, P., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. T., Thau, D., . . . Townshend, J. R. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* Vol. 342, 850-853.
- Hijmans, R. J. (2020). raster: Geographic Data Analysis and Modeling.
- Instituto Geográfico Nacional. (25 de abril de 2021). *Servicios OGC*. Obtenido de Sistema Nacional de Información Territorial: [https://www.snitcr.go.cr/servicios\\_ogc\\_lista\\_capas?k=bm9kbzo6Mjc=&nombre=IGN%20Cartograf%C3%ADa%201:25mil](https://www.snitcr.go.cr/servicios_ogc_lista_capas?k=bm9kbzo6Mjc=&nombre=IGN%20Cartograf%C3%ADa%201:25mil)
- Instituto Meteorológico Nacional. (2011). *Atlas Climatológico de Costa Rica*. San José: IMN.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2014). *Atlas de Costa Rica 2014*.
- INVU, PNUD. (2019). *Metodología para la delimitación digital de las áreas de protección de ríos, quebradas y arroyos*.
- Ke, G., Soukhavong, D., & Lamb, J. (2020). lightgbm: Light Gradient Boosting Machine.
- Kuhn, M., & Wickham, H. (2020). Tidymodels: a collection of packages for modeling and machine learning using tidyverse principles.
- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions*. Curran Associates, Inc.
- MINAE. (2015). *Estrategia Nacional REDD+ Costa Rica*. FONAFIFO.
- MINAE, Registro Nacional, CENAT, PNUD. (s.f.). *Monitoreo de cambio de uso en paisajes productivos*. Obtenido de <https://www.mocupp.org/>
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. (2001). *Índice de Desarrollo Social*. San José.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. (2007). *Índice de Desarrollo Social - 2007*. San José.

- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. (2013). *Índice de Desarrollo Social - 2013*. San José.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. (2017). *Índice de Desarrollo Social - 2017*. San José.
- Morera, C., Sandoval, L., & Alfaro, L. (2021). *Evaluación de corredores biológicos en Costa Rica: estructura de paisaje y procesos de conectividad-fragmentación*. Revista Geográfica de América Central.
- Obando, G., & Obando, M. (2020). *Caso de estudio Costa Rica: Tras el fin de la deforestación: estrategias y acciones para el uso sostenible de la tierra*. Climate Chance.
- Open Street Maps. (Febrero de 2021). *Cartografía de calles y carreteras*. Obtenido de <https://www.openstreetmap.org/about>
- Órgano de Normalización Técnica. (2014). *Cartografía de Zona Homogéneas*. Sistema Nacional de Información Territorial.
- Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*.
- R Core Team. (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Viena.
- Robalino, J., & Villalobos, L. (2014). *Efectividad de las políticas de conservación en Costa Rica*. San José: Vigésimoprimer informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible.
- Sierra, R., Cambroner, A., & Vega, E. (2016). *Patrones y factores de cambio de la cobertura forestal natural de Costa Rica, 1987-2013*.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación. (2019). *Cartografía de Áreas Silvestres Protegidas*. Sistema Nacional de Información Territorial.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación. (s.f.). *Cartografía de Corredores Biológicos*. Sistema Nacional de Información Territorial.
- Tyukavina, A., Baccini, A., Hansen, M. C., Potapov, P., Stehman, S. V., Houghton, R. A., . . . Goetz, S. J. (2015). Aboveground carbon loss in natural and managed tropical forests from 2000 to 2012. *Environmental Research Letters*.
- Universidad de Maryland, Global Forest Change. (2021). *Global Forest Change 2000-2020*. Obtenido de <https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2020-v1.8/download.html>
- Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., . . . Müller, K. (2019). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*.

## Notas

---

<sup>1</sup> La definición de la altura corresponde a los criterios metodológicos utilizados por los desarrolladores de la base de datos Global Forest Change -GFC- (Hansen, y otros, 2013) para la definición de cobertura arbórea.

<sup>2</sup> El porcentaje de cobertura arbórea mínimo del 30% en comparación con umbrales mayores se seleccionó puesto que permite obtener un incremento en la cantidad de áreas con cobertura arbórea y sus pérdidas. Una mayor cantidad de datos facilita el proceso de clasificación e implica predicciones de pérdida de cobertura mayores que se encuentran del lado de la seguridad en términos ambientales. A su vez Cunningham et al. (2019) encontraron una precisión del 80,6% en la clasificación de áreas boscosas o no boscosas en ese umbral que es muy similar a la máxima identificada en umbrales mayores -80,8%- para esta base de datos.

<sup>3</sup> Cushman, S., Macdonald, E., Landguth, E., Malhi, Y., & Macdonald, D. (2017). Multiple-scale prediction of forest loss risk across Borneo.

<sup>4</sup> Voight, C., Hernandez, K., García, C., & Gutiérrez, S. (2019) Predictive Modeling of Future Forest Cover Change Patterns in Southern Belize.

<sup>5</sup> Fuller, D., Hardiono, M., & Meijaard, E. (2011) Deforestation projections for carbon-rich peat swamp forests of Central Kalimantan, Indonesia.

<sup>6</sup> Dang Khoi, D., & Murayama, Y. (2010) Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam.

<sup>7</sup> Una explicación detallada se puede encontrar en los anexos.

<sup>8</sup> Definida por el Instituto Geográfico Nacional a escala 1:25 000 (Instituto Geográfico Nacional, 2021)

<sup>9</sup> De acuerdo con la capacidad de uso de la tierra (Fundación Neotrópica - CEAP, 1995).

<sup>10</sup> Se debe recalcar que la predicción solamente toma en cuenta la pérdida de cobertura arbórea más no la ganancia. Por ende, en términos netos, la pérdida será menor o inclusive habrá una ganancia de cobertura arbórea en el territorio nacional.

Esta pérdida esperada se basa en comportamientos pasados y, por lo tanto, modificaciones en los patrones de pérdida de cobertura arbórea anteriores tales como eventos naturales, políticas públicas, manejo de recursos naturales, modelos productivos, entre otros, impactarán negativa o positivamente en la predicción.

<sup>11</sup> Maxar Technologies, proveedor: Google Earth, 2021.

<sup>12</sup> Maxar Technologies, proveedor: Google Earth, 2021.

<sup>13</sup> Ver detalle de las variables y de la metodología “Valores Shapley” utilizada para cuantificar la contribución relativa en los anexos.

<sup>14</sup> Fundación Neotrópica - CEAP. (1995). Cartografía de capacidad de uso de la tierra, clases forestales.

<sup>15</sup> Ver detalle de las variables y de la metodología “Valores Shapley” utilizada para cuantificar la contribución relativa en los anexos.

<sup>16</sup> CNES/Airbus y Google, proveedor Google Earth, 2021.

<sup>17</sup> Ver detalle de las variables y de la metodología “Valores Shapley” utilizada para cuantificar la contribución relativa en los anexos.

<sup>18</sup> Ver detalle de las variables y de la metodología “Valores Shapley” utilizada para cuantificar la contribución relativa en los anexos.

<sup>19</sup> US Department of State Geographer Image, Airbus Image y Maxar Technologies, recuperado de Google Earth, 2021.

<sup>20</sup> Ver detalle de las variables y de la metodología “Valores Shapley” utilizada para cuantificar la contribución relativa en los anexos.

<sup>21</sup> Es importante indicar que se analizaron las siete variables más importantes, sin embargo, las otras 34 variables también tienen aportes en la predicción con la característica que tienen una contribución absoluta promedio menor a las presentadas.

<sup>22</sup> Creados a partir de una muestra pesada de 271.254 puntos a nivel nacional basada en la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.

<sup>23</sup> Valores de “1” en las variables “corredor” y “parque\_nacional” indican que el área analizada se encuentra dentro de un corredor biológico o un parque nacional. Valores de “0” indican lo contrario.

<sup>24</sup> Valores de “1” en las variables “cerca\_costa”, “cerca\_frontera\_norte” y “cerca\_frontera\_sur” indican que el área analizada se encuentra a menos de 500 m de la frontera o la costa. Valores de “0” indican lo contrario.

<sup>25</sup> Asociación se refiere al signo y magnitud de la pendiente de la recta de mejor ajuste.

<sup>26</sup> Índice de Desarrollo Social. Fuente: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2017.

<sup>27</sup> Carreteras de Costa Rica. Fuente: Open Street Map, 2021.

<sup>28</sup> Ubicación de poblados. Fuente: TEC, Atlas digital de Costa Rica, 2004.

<sup>29</sup> 1: Basal, 2: Premontano, 3: Montano Bajo, 4: Montano y 5: Subalpino. Fuente: CCT, MAG, 2004.

<sup>30</sup> 0: ausencia de plan regulador, 1: cumplimiento total del plan regulador. Fecha de los estadios 2018.

<sup>31</sup> Índice de Desarrollo Social. Fuente: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2017.

<sup>32</sup> La definición de la altura corresponde a los criterios metodológicos utilizados por los desarrolladores de la base de datos Global Forest Change -GFC- (Hansen, y otros, 2013) para la definición de cobertura arbórea.

<sup>33</sup> El porcentaje de cobertura arbórea mínimo del 30% en comparación con umbrales mayores se seleccionó puesto que permite obtener un incremento en la cantidad de áreas con cobertura arbórea y sus pérdidas. Una mayor cantidad de datos facilita el proceso de clasificación e implica predicciones de pérdida de cobertura mayores que se encuentran del lado de la seguridad en términos ambientales.

A su vez Cunningham et al. (2019) encontraron una precisión del 80,6% en la clasificación de áreas boscosas o no boscosas en ese umbral que es muy similar a la máxima identificada en umbrales mayores -80,8%- para esta base de datos.

<sup>34</sup> Cushman, S., Macdonald, E., Landguth, E., Malhi, Y., & Macdonald, D. (2017). Multiple-scale prediction of forest loss risk across Borneo.

<sup>35</sup> Voight, C., Hernandez, K., García, C., & Gutiérrez, S. (2019) Predictive Modeling of Future Forest Cover Change Patterns in Southern Belize.

<sup>36</sup> Fuller, D., Hardiono, M., & Meijaard, E. (2011) Deforestation projections for carbon-rich peat swamp forests of Central Kalimantan, Indonesia.

<sup>37</sup> Dang Khoi, D., & Murayama, Y. (2010) Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam.

<sup>38</sup> Una explicación detallada se puede encontrar en Anexos: Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica. Rodríguez, 2021.

<sup>39</sup> Se debe recalcar que la predicción solamente toma en cuenta la pérdida de cobertura arbórea más no la ganancia. Por ende, en términos netos, la pérdida será menor o inclusive habrá una ganancia de cobertura arbórea en el territorio.

Esta pérdida esperada se basa en comportamientos pasados y, por lo tanto, modificaciones en los patrones de pérdida de cobertura arbórea anteriores tales como eventos naturales, políticas públicas, manejo de recursos naturales, modelos productivos, entre otros, impactarán negativa o positivamente en la predicción.

<sup>40</sup> Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica en el periodo 2021-2025. Rodríguez, 2021.

<sup>41</sup> Mediante una comparación visual de la base de datos del GFC y la delimitación de la piña realizada por el MOCUPP en 2019, es notorio que particularmente los cultivos de piña al norte de La Virgen de Sarapiquí no fueron clasificados correctamente por la base de datos del GFC y por ende la probabilidad de pérdida arbórea en esa área podría ser mayor a la calculada.

<sup>42</sup> Delimitación de cultivos de piña en el año 2019 y pastizales en el 2018. Monitoreo de cambio de uso de la tierra en paisajes productivos.

<sup>43</sup> Global Forest Watch, 2021 (<https://www.globalforestwatch.org/>)

<sup>44</sup> Delimitación de cultivos de piña en el año 2019 y pastizales en el 2018. Monitoreo de cambio de uso de la tierra en paisajes productivos.

<sup>45</sup> Global Forest Watch, 2021 (<https://www.globalforestwatch.org/>)

<sup>46</sup> Ver detalle de las variables y de la metodología “Valores Shapley” utilizada para cuantificar la contribución relativa en el Anexo de la Predicción de la pérdida de cobertura arbórea en Costa Rica. Rodríguez, 2021.

<sup>47</sup> Es importante indicar que se analizaron las siete variables más importantes, sin embargo, las otras 34 variables también tienen aportes en la predicción con la característica que tienen una contribución absoluta promedio menor a las presentadas.

<sup>48</sup> Creados a partir de una muestra pesada de 93.789 puntos basada en la probabilidad de pérdida de cobertura arbórea.

<sup>49</sup> Valores de “1” en las variables “corredor” y “parque\_nacional” indican que el área analizada se encuentra dentro de un corredor biológico o un parque nacional. Valores de “0” indican lo contrario.

<sup>50</sup> Valores de “1” en la variable “cerca\_frontera\_norte” indican que el área analizada se encuentra a menos de 500 m de la frontera. Valores de “0” indican lo contrario.

<sup>51</sup> Índice de Desarrollo Social realizado por el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2017.

<sup>52</sup> 1: Basal, 2: Premontano, 3: Montano Bajo, 4: Montano y 5: Subalpino. Fuente: CCT. MAG, 2004.

<sup>53</sup> GFC: Global Forest Change, GCL: Global Cropland Dataset -modificado de Massey et al-, Landa: Clasificación para Costa Rica en el contexto de REDD+, Fernandez-Landa et al.