

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**EVALUACIÓN DE COLLECT EARTH COMO HERRAMIENTA
PARA ESTIMAR DATOS DE ACTIVIDAD PARA EL SISTEMA
DE MEDICIÓN, REPORTE Y VERIFICACIÓN DEL
PROGRAMA REDD+ EN COSTA RICA.**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

DAVID ALONSO ROMERO BADILLA

CARTAGO, COSTA RICA, 2018

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**EVALUACIÓN DE COLLECT EARTH COMO HERRAMIENTA
PARA ESTIMAR DATOS DE ACTIVIDAD PARA EL SISTEMA
DE MEDICIÓN, REPORTE Y VERIFICACIÓN DEL
PROGRAMA REDD+ EN COSTA RICA.**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

DAVID ALONSO ROMERO BADILLA

CARTAGO, COSTA RICA, 2018



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

EVALUACIÓN DE COLLECT EARTH COMO HERRAMIENTA PARA ESTIMAR DATOS DE ACTIVIDAD PARA EL SISTEMA DE MEDICIÓN, REPORTE Y VERIFICACIÓN DEL PROGRAMA REDD+ EN COSTA RICA.

David Alonso Romero Badilla*

RESUMEN

Se evaluó la consistencia de datos generados con la herramienta Collect Earth para el periodo 2013-2015 en Costa Rica y se realizaron estimaciones de uso y cambios de uso de la tierra en Costa Rica para el periodo 2014-2015, esto con el fin de demostrar la capacidad de Collect Earth para generar datos de actividad bajo los enfoques de cálculo del sistema MRV REDD+ de Costa Rica. Los datos fueron obtenidos por 14 distintos evaluadores mediante Evaluación Visual Multitemporal de puntos de muestreo utilizando imágenes de alta resolución. Para evaluar la consistencia de los datos entre diferentes evaluadores, se realizó una segunda evaluación del uso de la tierra en una submuestra de los datos. Las evaluaciones fueron comparadas mediante una prueba t-student de medias pareadas y utilizando matrices de confusión. A partir de datos previamente recolectados para el periodo 2014-2015, se hicieron estimaciones de áreas de cambio de uso según categorías generales de cambio, y según categorías de actividad para las actividades de REDD+ CR, además de evaluar dos distintos tipos de estratificaciones. La consistencia global entre evaluadores fue de 73 % para 2013 y 69 % para 2015. Las mayores fuentes de inconsistencia fueron la confusión entre subcategorías de tierras forestales y entre otras clases estrechamente relacionadas o con límites difusos entre sí. Se demostró que es posible hacer las estimaciones de datos de actividad requeridas para el MRV de REDD+ CR a partir de Collect Earth, sin embargo, es necesario intensificar el muestreo en las áreas de interés para reducir las incertidumbres.

Palabras clave: Evaluación visual multitemporal, Imágenes satelitales de alta resolución, Cambios de uso de la tierra, Deforestación, Datos de referencia.

ABSTRACT

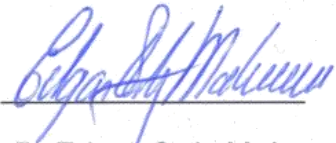
This study examines the capacity of the software Collect Earth to generate activity data as required by Costa Rica's REDD+ MRV system. Thereby, consistency of Collect Earth data obtained for the 2013-2015 period in Costa Rica was evaluated, and estimations of land use and land use changes for the cycle 2014-2015 were made. The data was obtained by 14 different interpreters through Multitemporal Visual Interpretation of sampling points using high resolution satellite imagery. To evaluate data consistency between interpreters a second land use interpretation was made on a subsample of the data. Variability between land use interpretations was assessed through a paired-sample t test, and confusion matrices. Using previously collected data for the 2014-2015 period, estimations about areas of change were made according to general REDD+ land use change categories and REDD+CR activities categories. Evaluation of two different types of stratifications were also made. Results show data global consistency was 73 and 69 % for 2013 and 2015 respectively. The main source of disagreements between interpreters was the confusions among the subcategories of forestry lands and other closely related categories. The study demonstrates that it is possible to estimate activity data following the REDD+ CR MRV system's designed approaches using Collect Earth. However, it is necessary to intensify the sampling in areas of interest in order to reduce uncertainties.

Keywords: Multitemporal visual interpretation, High resolution satellite imagery, land use changes, deforestation, reference data.

*Romero Badilla, DA. 2018. Evaluación de Collect Earth como herramienta para estimar datos de actividad para el sistema de Medición, Reporte y verificación del programa REDD+ en Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 65p.

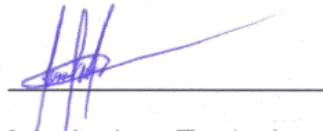
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Ph.D. Edgar Ortiz Malavassi, M.A. Andrea Tapia Arenas y M.Sc. German Obando Vargas como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



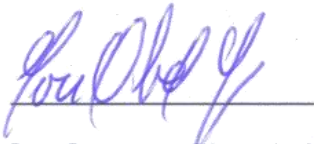
Ph. D. Edgar Ortiz Malavassi

Director de Tesis



M.A. Andrea Tapia Arenas

Lectora



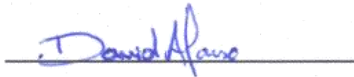
M.Sc. German Obando Vargas

Lector



M.Sc. Dorian Carvajal Vanegas

Coordinador Tesis



David Alonso Romero Badilla

Estudiante

Dedicatoria

A mis padres, a quienes les debo todo.

Agradecimientos

A todo el personal de la Secretaría REDD+ de FONAFIFO: María Elena Herrera, Guisella Quirós, Priscilla Ávila, Héctor Arce y German Obando.

A mi profesor y tutor de tesis Ph.D Edgar Ortiz Malavassi, por su apoyo y orientación en el desarrollo de este trabajo.

A la profesora Cynthia Salas por su gran ayuda para la elaboración del anteproyecto de este trabajo.

Índice General

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Materiales y métodos..... | 4 |
| 2.1 Sitio de estudio | 4 |
| 2.2 Datos de uso de la tierra | 5 |
| 2.3 Evaluación de consistencia de los datos | 10 |
| 2.3.1 Prueba t de student para medias de observaciones pareadas..... | 10 |
| 2.3.2 Matrices de error..... | 11 |
| 2.4 Estimación de datos de actividad REDD+ para Costa Rica en el periodo 2014-2015..... | 13 |
| 2.4.1 Estimación de estadísticas de uso de la tierra 2014-2015..... | 13 |
| 2.4.2 Estimación de áreas cambios de uso de la tierra en Costa Rica para el periodo 2014-2015 | 16 |
| 3. Resultados y discusión | 21 |
| 3.1 Evaluación de consistencia de los datos | 21 |
| 3.1.1 Prueba t de student para medias de observaciones pareadas..... | 21 |
| 3.1.2 Matrices de error..... | 23 |
| 3.2 Estimación de datos de actividad REDD+ para Costa Rica en el periodo 2014-2015..... | 35 |
| 3.2.1 Estadísticas de uso de la tierra para el periodo 2014-2015..... | 36 |
| 3.2.2 Estimación de cambios de uso de la tierra y actividades REDD+ para Costa Rica en el periodo 2014-2015..... | 41 |
| 4. Conclusiones | 54 |
| 5. Recomendaciones..... | 57 |
| 6. Bibliografía..... | 59 |
| Anexos | 63 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación de Costa Rica en Centroamérica. | 4 |
| Figura 2. Distribución geográfica de las zonas de vida en Costa Rica..... | 5 |
| Figura 3. Malla de 10 166 puntos de distribución triangular regular para el Sistema de Monitoreo de cobertura y uso de la tierra en Costa Rica. | 6 |
| Figura 4. Ejemplo de la parcela de muestreo utilizada en el estudio. | 7 |
| Figura 5. Agrupación de los puntos de muestreo en regiones. | 9 |
| Figura 6. Mapa de tipos de bosque potenciales en Costa Rica. | 19 |
| Figura 7. Variación de la consistencia global entre evaluaciones bajo 3 distintos escenarios..... | 30 |
| Figura 8. Estimación del uso de la tierra en Costa Rica para el año 2014 según dos distintos métodos de estimación | 36 |
| Figura 9. Estimación del uso de la tierra en Costa Rica para el año 2015 según dos distintos métodos de estimación | 37 |
| Figura 10. Error relativo de la estimación de porcentajes de uso de la tierra en Costa Rica para el año 2014 bajo dos distintos métodos de estimación..... | 38 |
| Figura 11. Error relativo de la estimación de porcentajes de uso de la tierra en Costa Rica para el año 2015 bajo dos distintos métodos de estimación..... | 38 |
| Figura 12. Porcentaje de uso a nivel de subcategorías para tierras forestales en Costa Rica para los años 2014 y 2015. | 40 |

Índice de Cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Ejemplo de matriz de error | 12 |
| Cuadro 2. Descripción de las categorías generales de cambio de REDD+ | 13 |
| Cuadro 3. Actividades REDD+ consideradas en el estudio. | 18 |
| Cuadro 4. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de uso del suelo en Costa Rica a nivel de categoría para el año 2013. . | 21 |
| Cuadro 5. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de uso del suelo en Costa Rica a nivel de categoría para el año 2015. . | 22 |
| Cuadro 6. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de las subcategorías de tierras forestales en Costa Rica para el año 2013. | 22 |
| Cuadro 7. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de las subcategorías de tierras forestales en Costa Rica para el año 2015. | 23 |
| Cuadro 8. Proporción de datos y consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2013. | 24 |
| Cuadro 9. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2015..... | 25 |
| Cuadro 10. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2013, utilizando únicamente imágenes de alta resolución..... | 26 |
| Cuadro 11. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2015, utilizando únicamente imágenes de alta resolución..... | 27 |
| Cuadro 12. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2013, agrupando los bosques en una sola categoría. | 28 |
| Cuadro 13. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2015, agrupando los bosques en una sola categoría. | 29 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 14. Consistencia global por grupo de muestreo por año. | 33 |
| Cuadro 15. Proporción de área y consistencia de los datos de determinación de cambios de uso considerando todos los datos..... | 34 |
| Cuadro 16. Proporción de área y consistencia de los datos de determinación de cambios de uso considerando únicamente los datos con información de imágenes de alta resolución. | 35 |
| Cuadro 17. Porcentajes de uso de la tierra y error de la estimación para las tierras no forestales en Costa Rica para los años 2014 y 2015. | 41 |
| Cuadro 18. Estimación del área y límites de confianza para los cambios de uso de REDD+ en Costa Rica en el periodo 2014-2015, bajo distintos escenarios..... | 42 |
| Cuadro 19. Áreas y límites de confianza para los cambios generales de uso REDD+ por tipo de bosque en Costa Rica para el periodo 2014-2015. | 45 |
| Cuadro 20. Áreas y límites de confianza para los cambios de uso de REDD+ dentro y fuera de áreas protegidas en Costa Rica para el periodo 2014-2015. | 46 |
| Cuadro 21. Áreas y límites de confianza para las actividades REDD+ en Costa Rica en el periodo 2014-2015. | 47 |
| Cuadro 22. Conservación de reservas de carbono en bosques maduros..... | 48 |
| Cuadro 23. Pérdidas de carbono en Bosques primarios..... | 48 |
| Cuadro 24. Pérdidas de carbono en Bosques secundarios..... | 49 |
| Cuadro 25. Pérdidas de carbono en plantaciones forestales..... | 50 |
| Cuadro 26. Ganancias de carbono en bosques secundarios..... | 51 |
| Cuadro 27. Ganancias de carbono en plantaciones forestales..... | 52 |

Índice de Anexos

| | |
|---|----|
| Anexo 1. Categorías de uso de la tierra consideradas en el estudio. | 63 |
| Anexo 2. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de las subcategorías de tierras no forestales en Costa Rica para el año 2013. | 67 |
| Anexo 3. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de las subcategorías de tierras no forestales en Costa Rica para el año 2015. | 68 |

1. Introducción

El mecanismo de reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques, la conservación y aumento de reservas de carbono forestal (REDD+) ha surgido como una estrategia clave para la mitigación del cambio climático [1]. Se trata de una iniciativa de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que pretende reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) concediendo un valor financiero al carbono almacenado en los bosques y brindando incentivos económicos para los países en desarrollo participantes [2], [3].

El monitoreo de emisiones y remociones de GEI en los bosques mediante metodologías robustas es fundamental para el éxito de REDD+ [4]. Los países participantes como parte de su “preparación” para REDD+ deben desarrollar, entre otros productos, un Nivel de Referencia de Emisiones Forestales (NREF) y un Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF) que integre un apropiado sistema de monitoreo y Medición, Reporte y Verificación (MRV) [3], [5].

El NREF es una cuantificación de las emisiones históricas nacionales, que funciona como línea base frente a la cual se contrastan los resultados de un país respecto a la implementación de REDD+ [3]; mientras que el sistema MRV se encarga de proveer información periódica, transparente y consistente sobre los resultados obtenidos a través de las medidas y políticas nacionales implementadas para REDD+ [2], [5], [6]. El NREF y el MRV se deben implementar bajo un enfoque progresivo que permita hacer mejoras mediante la incorporación de datos más completos o mejores metodologías de acuerdo con las capacidades nacionales [5].

Para el cálculo de emisiones de GEI se debe estimar y monitorear dos variables clave: (i) datos de actividad; y (ii) factores de emisión [4], [7]. Los datos de actividad se definen como la magnitud de la actividad humana generadora de emisiones o remociones en un determinado periodo de tiempo [8], que en el caso de REDD+ se

refiere al área de extensión de las actividades REDD+ expresado en hectáreas por año [3]. Los métodos de estimaciones de datos de actividad para REDD+ deben ser coherentes con la orientación de buenas prácticas del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para inventarios de gases de efecto invernadero, lo cual implica que se deben satisfacer dos criterios: (i) las estimaciones no son excesivas ni escasas, en la medida en que se pueda determinar, y (ii) las incertidumbres se deben minimizar tanto como sea posible [5], [9].

La generación de datos de actividad para REDD+ se ha basado principalmente en la elaboración de mapas de uso o cambio de uso de la tierra a partir de imágenes satelitales, a partir de los cuales se obtienen las áreas de cambio mediante el conteo de píxeles asignados a las distintas clases [4], [10], y es precisamente este método el que ha utilizado Costa Rica para hacer las estimaciones de su programa REDD+ [2]. Sin embargo, se ha manifestado que este método conlleva sesgo debido a que no considera errores de clasificación; además, no genera directamente la información necesaria para construir intervalos de confianza, por lo que estos métodos no presentan la robustez estadística para garantizar que se cumpla con las directrices del IPCC [5], [12], [13], [14].

Una alternativa emergente que resulta estadísticamente rigurosa es el uso de datos de referencia para estimar los datos de actividad [10], [15]. Los datos de referencia son la mejor observación disponible de las condiciones del terreno; estos son recolectados mediante un muestreo probabilístico y por tanto se pueden utilizar para evaluar la exactitud de la clasificación de mapas, al mismo tiempo que pueden ser utilizados por sí solos para generar estimaciones de áreas de interés (en este caso las actividades REDD+) [5], [14], [16].

Las observaciones de campo son usualmente consideradas una fuente óptima de datos de referencia, sin embargo, en la mayoría de los casos no resultan efectivas desde el punto de vista de costos, por lo que se suele recurrir a interpretaciones visuales de datos de sensores remotos [5] [10].

Olofsson et al. [17] indica que los datos obtenidos por interpretación visual de imágenes de alta resolución pueden presentar incertidumbre asociada a la interpretación, la cual se puede separar en dos partes: (i) sesgo del intérprete, definido como el error en la asignación de una clase a la unidad de muestreo; (ii) variabilidad del intérprete, definido como la diferencia en la asignación de una clase a la misma unidad de muestreo (discrepancia entre evaluaciones, complementario a “consistencia de los datos”); por lo que a la hora de trabajar con datos de referencia provenientes de evaluación visual resulta importante evaluar la consistencia de estos datos para cumplir con las orientaciones del IPCC.

Recientemente, ha surgido Collect Earth como una herramienta útil para el MRV de REDD+. Collect Earth es un software innovador, de carácter gratuito y código libre, desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), que permite realizar muestreos por puntos para la recolección y análisis del uso de la tierra mediante la Evaluación Visual Multitemporal (EVM) de imágenes de alta y muy alta resolución, que cumplan con los requerimientos de monitoreo de REDD+ [18], permitiendo modificar el diseño de muestreo, el tamaño de las parcelas, y la forma de recolección de datos para ajustarse a las necesidades específicas de cada país [19].

Ante esto, y como parte de su enfoque progresivo, Costa Rica busca evaluar nuevos métodos de estimación de datos de actividad que sean consistentes con los objetivos de su programa REDD+ y con las orientaciones metodológicas del IPCC. Por tanto, este trabajo tiene como objetivo general demostrar la capacidad de Collect Earth para estimar datos de actividad en el programa REDD+ de Costa Rica, y como objetivos específicos: (i) evaluar la consistencia de datos existentes de uso y cambios de uso de la tierra en Costa Rica para el periodo 2013-2015, y (ii) estimar datos de actividad según los sistemas de cálculo diseñados para el programa REDD+ CR a partir de datos de uso existentes del periodo 2014-2015.

2. Materiales y métodos

2.1 Sitio de estudio

Costa Rica es un país de América Central, ubicado entre las coordenadas geográficas 8°02' y 11°13' de latitud Norte y los 82°34' y 85°58' de longitud Oeste, limitando al Norte con Nicaragua, al Sureste con Panamá, al Oeste con el Océano Pacífico y al Este con el mar Caribe (Figura 1) [20]. El área continental del país según el NREF emitido por Costa Rica ante la CMNUCC [21] corresponde a 5 133 939,50 ha.

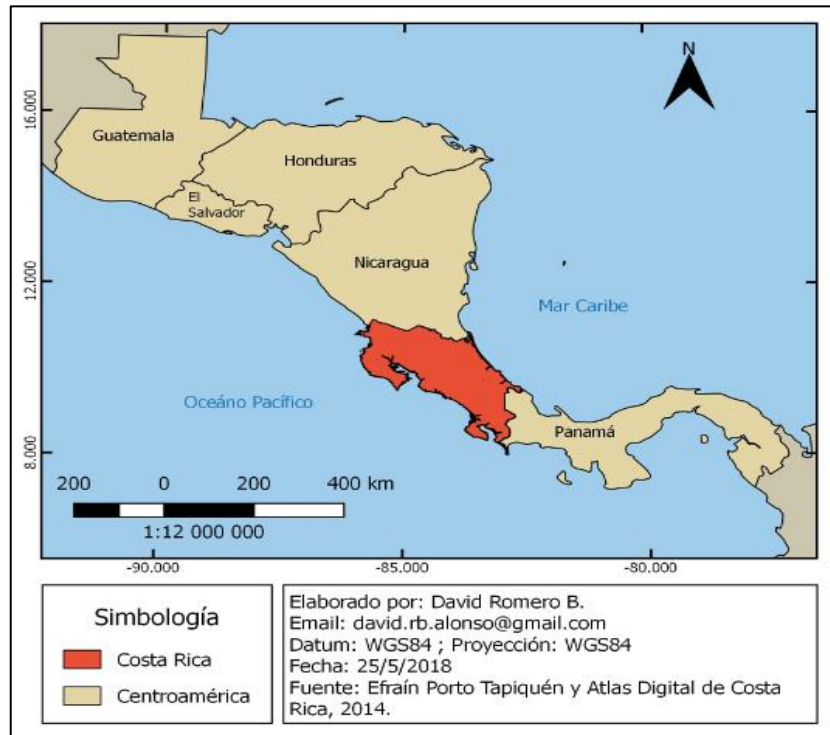


Figura 1. Ubicación de Costa Rica en Centroamérica.

A pesar de estar ubicado en la franja neotropical, el país posee una gran variedad de climas que dan lugar a 12 distintas zonas de vida según la clasificación de Holdridge [22] (ver Figura 2). El promedio anual de temperatura oscila entre 26 °C en la costa caribe y 27,8 °C en la costa pacífica, hasta 4,5 °C en el punto más alto del país;

mientras que la precipitación anual oscila entre 1 400 y 8 000 mm con un promedio a nivel nacional de 3300 mm anuales [23].

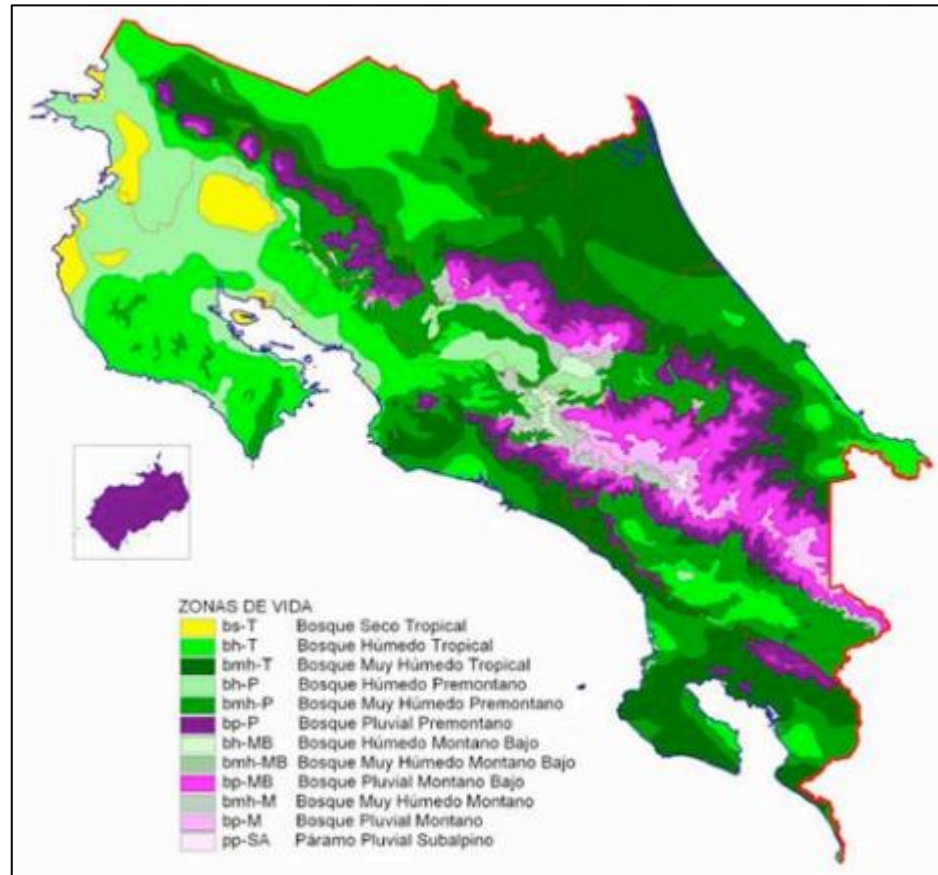


Figura 2. Distribución geográfica de las zonas de vida en Costa Rica. Fuente: [28].

2.2 Datos de uso de la tierra

Se utilizaron los datos de uso de la tierra en Costa Rica recolectados por FONAFIFO para los periodos 2012-2013 y 2014-2015. Estos datos fueron generados mediante evaluación visual multitemporal de puntos de muestreo con imágenes satelitales por medio de la plataforma Collect Earth, para lo cual se empleó un grupo de 14 distintos evaluadores y se siguió el protocolo de etiquetado para la interpretación visual de puntos de muestreo para uso de la tierra realizado por Tapia y Ortiz [24].

El muestreo se realizó a partir de la malla de puntos adoptada por el SIMOCUTE (Figura 3) la cual contiene 10166 puntos con sistema de coordenadas sin proyectar WGS84, obtenidos a partir de la malla triangular regular propuesta por Ortiz [25] para el inventario forestal nacional.

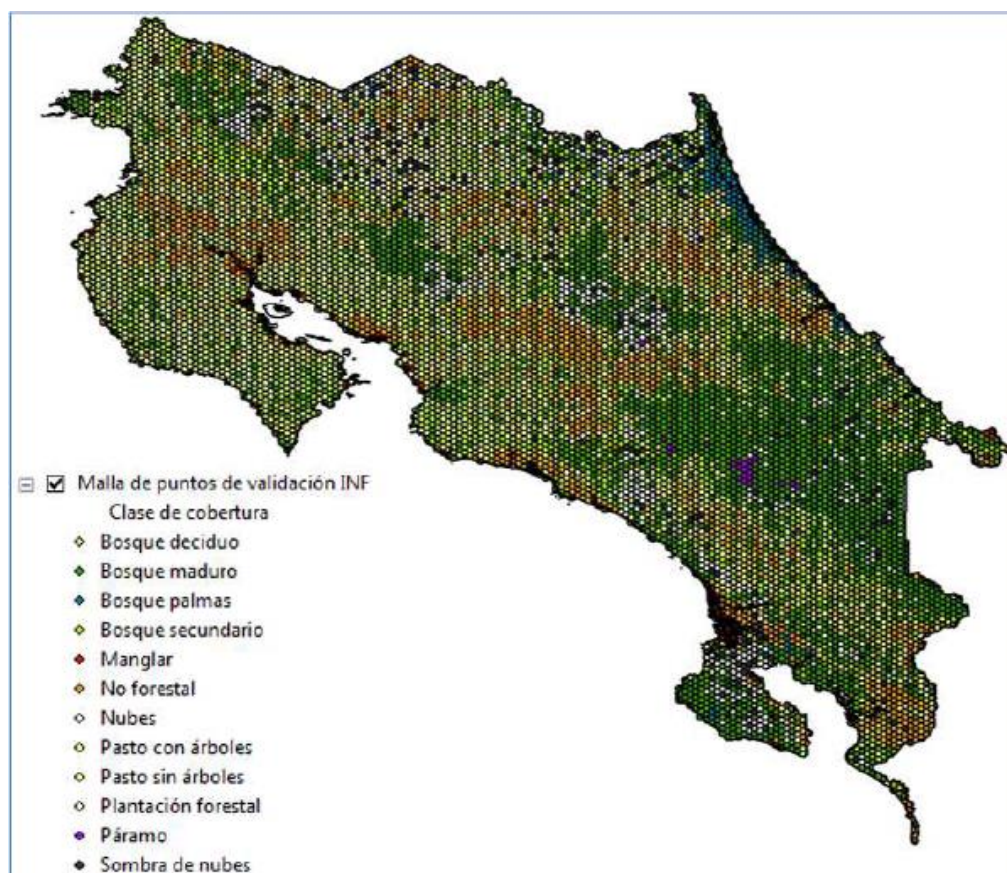


Figura 3. Malla de 10 166 puntos de distribución triangular regular para el Sistema de Monitoreo de cobertura y uso de la tierra en Costa Rica. Fuente: [26].

En cada punto de la malla se generó una parcela de muestreo de 0,98 hectáreas con forma cuadrada, la cual contenía dentro una grilla de 7x7 puntos (ver ejemplo en Figura 4).



Figura 4. Ejemplo de la parcela de muestreo utilizada en el estudio.

En cada una de las parcelas, utilizando una plantilla de encuesta de Collect Earth diseñada, se registró la siguiente información:

1. Imágenes utilizadas

Se utilizaron diferentes imágenes para la interpretación de uso. Su empleo dependió de la disponibilidad de estas. El orden de prioridad fue: (1) Imágenes satelitales de alta resolución de Digital Globe (Google Earth) o Bing Maps; (2) Imágenes satelitales de mediana resolución de Sentinel 2 y; (3) Imágenes satelitales de mediana resolución de Landsat.

2. Fecha de referencia

El rango de fechas a utilizar para la interpretación de uso y cobertura fue de julio 2011 a junio 2012 para el año 2012 y de julio 2012 a junio 2013 para el año 2013, o en su defecto, la imagen anterior y más cercana a estos periodos disponible; mientras que para el año 2014 el periodo fue de julio 2013 a junio 2014 y para el año 2015 fue de julio 2014 a junio 2015, o en su defecto, la imagen posterior y más cercana a estos periodos disponible.

3. Evaluación de uso y cobertura

Las categorías (nivel 1) y subcategorías (nivel 2) de uso evaluadas, con su respectiva definición operativa, se muestran en el anexo 1, sin embargo para este estudio se agruparon las clases de “Bosque maduro deciduo” y “Bosque maduro siempreverde” en una sola categoría de Bosque maduro y las clases de “Bosque secundario deciduo” y “Bosque secundario siempreverde” en una única categoría de Bosque secundario debido a que esta segregación de bosques en deciduo y siempreverde genera una alta variación en los datos ya que resulta altamente difícil hacer esta distinción a partir de imágenes. La evaluación se realizó reportando porcentajes de cada uno de los usos presentes en la parcela considerando todos los puntos de la sub-malla.

4. Existencia y causa de cambio de uso de la tierra

Se registraron todos los cambios de uso observados en las parcelas. Aunado a esto, se registró la posible causa del cambio. Las causas consideradas fueron: deslizamiento, incendio, cambio en sistema productivo y otro (en cuyo caso se especificó la causa como tal).

5. Nivel de confianza de la interpretación

Se consideraron tres niveles de confianza en la interpretación: alto, medio y bajo.

6. Observaciones importantes

Se ingresaron todas las observaciones consideradas importantes sobre la evaluación y que pudiesen ser de utilidad al analizar los datos.

Las 10 166 unidades de muestreo fueron agrupadas en 12 regiones según se muestra en la figura 5.

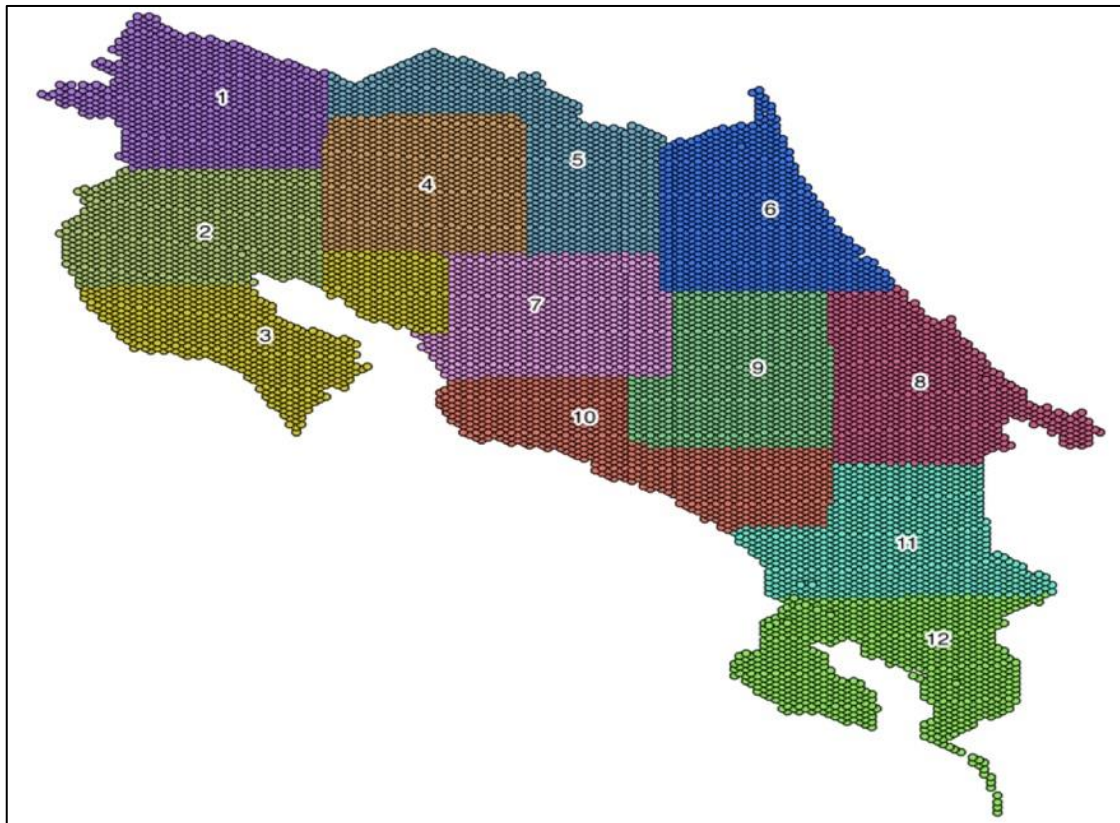


Figura 5. Agrupación de los puntos de muestreo en regiones.

La información recolectada, fue guardada como archivos CSV delimitado por comas que posteriormente fueron transformados a hojas de cálculo del programa Microsoft Excel para realizar el análisis.

2.3 Evaluación de consistencia de los datos

Para examinar la variabilidad entre intérpretes asociada a la EVM utilizando Collect Earth, se seleccionó sistemáticamente una submuestra del 10% del total de puntos de muestreo (i.e. 1 016 puntos). En esta submuestra se realizó una segunda evaluación del uso de la tierra para los años 2013 y 2015 siguiendo el mismo protocolo anteriormente detallado, con la única diferencia de que para el año 2013 en caso de no haber una imagen con fecha entre julio 2012 a junio 2013 disponible, se utilizó la imagen con fecha anterior más cercana a este periodo y no con fecha posterior como se realizó con los datos originales. A esta evaluación de la submuestra realizada en este estudio se le llamó evaluación 2, mientras que los datos originales evaluados por FONAFIFO se les llamó evaluación 1.

Una vez realizada la evaluación 2 se procedió a comparar ambas evaluaciones. Primeramente, por medio de una prueba t de student para medias de observaciones pareadas, y posteriormente mediante el uso de matrices de error.

2.3.1 Prueba t de student para medias de observaciones pareadas

La prueba t se realizó con un nivel de significancia (α) de 0,05, y se utilizaron las fórmulas 1 a 4

$$d_{if} = x_{if1} - x_{if2} \quad (1)$$

$$d_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{if} \quad (2)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{if} - d_f)^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$t_c = \frac{d_f}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \quad (4)$$

Donde:

x_{if1} = proporción de uso f en la parcela i según la evaluación 1

x_{if2} = proporción de uso f en la parcela i según la evaluación 2

d_{if} = diferencia entre las proporciones de uso f en la parcela i

d_f = diferencia promedio de proporción de la clase de uso de la tierra f

S_d = Desviación estándar de la diferencia para la clase de uso de la tierra f

t_c = estadístico t calculado

Luego, el valor p se obtuvo a partir de la función de distribución t para dos colas, de Microsoft Excel, considerando 1015 grados de libertad.

2.3.2 Matrices de error

Para analizar la consistencia en la asignación de uso de la tierra a las unidades de muestreo entre las evaluaciones 1 y 2 de la submuestra, se utilizaron matrices de error. Para esto, se procedió primeramente asignar una única categoría de uso de la tierra a cada parcela, considerando la definición de bosque utilizada en el NREF emitido por Costa Rica ante el FCPF [21], por lo que se utilizó el siguiente criterio: si la parcela presentaba al menos un 30% de bosque, se asignó el tipo de bosque con mayor porcentaje; de lo contrario, se asignó el uso que presentara mayor porcentaje dentro de la parcela.

Luego, para construir la matriz se realizó una tabulación cruzada de las categorías de uso asignadas a las parcelas en la evaluación 1 contra las asignadas en la evaluación 2. Los datos fueron ingresados en términos de proporciones, de manera que la diagonal principal mostrara la proporción de datos donde existió consistencia entre ambas evaluaciones (concordancia entre intérpretes) y los datos fuera de ella muestran la proporción de datos en donde hubo discrepancia entre las evaluaciones tal como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Ejemplo de matriz de error con datos de celda expresados como proporciones donde p_{ij} es la proporción de unidades pertenecientes a la clase i según la evaluación 1 y a la clase j según la evaluación 2.

| | | Evaluación 2 (j) | | | | Total |
|------------------|---------|------------------|----------|-----|----------|----------|
| | | Clase 1 | Clase 2 | ... | Clase k | |
| Evaluación 1 (i) | Clase 1 | p_{11} | p_{12} | ... | p_{1k} | $p_{1.}$ |
| | Clase 2 | p_{21} | p_{22} | ... | p_{2k} | $p_{2.}$ |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | Clase k | p_{k1} | p_{k2} | ... | p_{kk} | $p_{k.}$ |
| | Total | $p_{.1}$ | $p_{.2}$ | ... | $p_{.k}$ | 1 |

A partir de esta matriz se estimó la consistencia global (CG) como la sumatoria de los valores de la diagonal (ecuación 5).

$$CG = \sum_{j=1}^k p_{jj} \quad (5)$$

Además, se calculó la consistencia del usuario¹ (CU_i) y consistencia del productor² (CP_j), con las ecuaciones 6 y 7 respectivamente.

$$CU_i = p_{ii}/p_{i+} \quad (6)$$

$$CP_j = p_{jj}/p_{+j} \quad (7)$$

Esta evaluación de consistencia por medio de matrices se realizó bajo tres escenarios para detectar fuentes de variación:

- a) Escenario 1: comparación de todos los datos.
- b) Escenario 2: comparación de únicamente el grupo de datos con información de imágenes de alta resolución
- c) Escenario 3: comparación de todos los datos agrupando las tierras forestales en una única categoría de bosque

¹ Proporción con consistencia del total de datos asignados a una determinada clase en la evaluación 1

² Proporción con consistencia del total de datos asignados a una determinada clase en la evaluación 2

Además, se estimó la variación de consistencia entre grupos³ para determinar el efecto de la región en la consistencia de los datos.

Finalmente, se estimó la variabilidad de los datos a la hora de estimar cambios de uso. Para esto, se clasificó cada parcela en una categoría de cambio según los usos asignados en cada año. Las categorías de cambio consideradas fueron las categorías generales de cambio de REDD+ las cuales se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Descripción de las categorías generales de cambio de REDD+

| Categoría de cambio | Descripción |
|---------------------|---|
| Bosque estable | Tierras forestales que se mantienen como tales |
| Deforestación | Tierras forestales convertidas a tierras no forestales |
| No bosque estable | Tierras no forestales que se mantienen como tales |
| Nuevos bosques | Tierras no forestales convertidas a tierras forestales |
| Sin información | Aquellas parcelas en las que en algún año se le asignó el uso de nubes, sombras o sin información |

2.4 Estimación de datos de actividad REDD+ para Costa Rica en el periodo 2014-2015

A partir de los datos de uso de la tierra en Costa Rica para el periodo 2014-2015 recolectados por FONAFIFO, se realizaron estimaciones de datos de actividad REDD+, a saber: (i) estadísticas de uso de la tierra para ambos años y; (ii) áreas de cambio de uso de la tierra.

2.4.1 Estimación de estadísticas de uso de la tierra 2014-2015

La estimación de estadísticas de uso de la tierra en 2014 y 2015, se realizó primeramente a nivel de categoría utilizando dos métodos: (i) estimación por porcentajes y (ii) estimación por parcela.

³ Agrupación de datos por región, mostrado en la figura 5.

Para la estimación por porcentajes, se calculó el porcentaje de uso promedio para cada categoría de uso de la tierra tanto a nivel 1 (categoría) como a nivel 2 (subcategoría). Seguidamente, se obtuvo la desviación estándar con la ecuación 8.

$$S_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{if} - X_f)^2}{n-1}} \quad (8)$$

Donde:

S_f = Desviación estándar de la clase de uso de la tierra f

x_{if} = Proporción del uso f en la parcela i

X_f = Proporción promedio de la clase de uso de la tierra f

Luego se calculó el error estándar y el error de muestreo absoluto asociados a la media de cada clase de uso de la tierra con las ecuaciones 9 y 10 respectivamente.

$$S_{xf} = \frac{S_f}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

$$E_f = S_{xf} * T_{\alpha/2, n-1} \quad (10)$$

Donde:

S_{xf} = Error estándar de la media para el porcentaje de la clase de uso de la tierra f

E_f = Error de muestreo absoluto para la estimación de la media del porcentaje de la clase de uso de la tierra f

$T_{\alpha/2, n-1}$ = T tabular para para un nivel de significancia (α) de 0,05 y 1015 grados de libertad = 1,96

A partir de estos, se calcularon los intervalos de confianza de confianza al 95% para la estimación del porcentaje de cada clase de uso mediante la ecuación 11.

$$IC_f = X_f \pm E_f \quad (11)$$

Donde:

IC_f = Intervalo de confianza al 95% para la clase de uso f

X_f = Porcentaje de uso promedio de la categoría de uso de la tierra f

E_f = Error de muestreo absoluto para la estimación de la media del porcentaje de la clase de uso de la tierra f.

Para la estimación por parcela, se asignó un único uso de la tierra a cada parcela (uso general de la parcela) con el mismo criterio anteriormente descrito en la sección 2.3.2. Luego se estimó la proporción y el porcentaje de área correspondiente a cada uso de la tierra con las ecuaciones 12 y 13 respectivamente.

$$p_f = \frac{n_f}{N} \quad (12)$$

$$P(\%)_f = p_f * 100 \quad (13)$$

Donde:

p_f = proporción de uso de la tierra f.

$P(\%)_f$ = porcentaje de uso de la tierra f.

n_f = cantidad de unidades de muestreo pertenecientes a la clase de uso f.

N = cantidad total de unidades de muestreo.

Luego, se calculó el error de muestreo absoluto, el error de muestreo relativo, el error relativo y los intervalos de confianza de la estimación con las ecuaciones 14, 15 y 16 respectivamente.

$$E_f = \sqrt{\frac{p_f * (1 - p_f)}{N}} * 1,96 * 100 \quad (14)$$

$$E(\%)_f = \frac{E_f}{P(\%)_f} * 100 \quad (15)$$

$$IC_f = P(\%)_f \pm E_f \quad (16)$$

Donde:

p_f = proporción de uso de la tierra f.

$P(\%)_f$ = porcentaje de uso de la tierra f.

E_f = error absoluto de la estimación del porcentaje de uso de la tierra f con una confiabilidad de 95 %.

$E(\%)_f$ = error relativo de la estimación del porcentaje de uso de la tierra f con una confiabilidad de 95 %.

IC_f = Intervalo de confianza al 95% para el porcentaje de uso de la tierra f.

Luego se realizó la estimación de estadísticas de uso para Costa Rica en el periodo 2014-2015 a nivel de subcategoría utilizando el método por porcentajes.

2.4.2 Estimación de áreas cambios de uso de la tierra en Costa Rica para el periodo 2014-2015

Para la estimación de las áreas de cambio de uso de la tierra en Costa Rica durante el periodo 2014-2015, se utilizó el uso general de la tierra asignado anteriormente cada unidad de muestreo. Los usos en ambos años fueron comparados mediante una tabulación cruzada para determinar los cambios de uso ocurridos en el periodo de estudio. Estos cambios fueron agrupados según las clases generales de cambio descritas en el cuadro 2, y se estimó las áreas de estas y sus respectivos errores y límites de confianza. Este análisis se realizó dividiendo los datos en 4 distintos grupos para examinar fuentes de variación en las estimaciones de áreas de cambio, a saber:

- a) Escenario 1: conjunto total de puntos de muestreo

- b) Escenario 2: el grupo de datos con información de imágenes de alta resolución
- c) Escenario 3: el grupo de datos con información de imágenes de alta resolución y que presentan un desplazamiento entre imágenes no mayor a 7m.
- d) Escenario 4: el grupo de datos con información de imágenes de alta resolución, que presentan un desplazamiento entre imágenes no mayor a 7m y cuyas fechas se encuentran en dentro del rango de enero 2012 a junio 2014 para el año 2014 y de julio 2014 a diciembre 2016 para el año 2015.

La decisión de establecer un límite de máximo 7 m de desplazamiento se debe a que esta es la distancia que existe entre cada punto de la grilla.

Posteriormente se utilizó el grupo de datos del escenario 4, debido a que se consideró este como el escenario ideal, para hacer estimaciones de áreas, errores y límites de confianza de:

- i. Cambios de uso según las categorías generales de cambio REDD+⁴ estratificado por tipo de bosque.
- ii. Cambios de uso según las categorías generales de cambio REDD+⁴ estratificado según áreas protegidas y no protegidas.
- iii. Actividades REDD+.
- iv. Actividades REDD+ por tipo de bosque.

Las actividades REDD+ consideradas en este trabajo se muestran en el cuadro 3.

⁴ Deforestación, bosque estable, nuevos bosques, y no bosque estable. Descritos en el cuadro 2.

Cuadro 3. Actividades REDD+ consideradas en el estudio.

| Simbología | Descripción |
|------------|---|
| DF | Deforestación |
| NL | Pérdidas no antrópicas de bosques |
| CO | Conservación de existencias de carbono forestal. |
| AE.ff | Aumento de existencias de carbono forestal en bosques que permanecen como bosques |
| AE.nf | Aumento de existencias de carbono forestal en tierras convertidas a bosques |
| AE.pp | Aumento de existencias de carbono forestal en plantaciones forestales que permanecen como plantaciones forestales |
| AE.np | Aumento de existencias de carbono forestal en tierras convertidas a plantaciones forestales |
| EXL | Áreas sin información excluidas de la contabilidad |
| NA | Áreas sin existencias de carbono forestal donde REDD+ no es aplicable |

La estratificación por tipos de bosque se realizó considerando los mismos tipos de bosque considerados en el NREF de Costa Rica [21], los cuales fueron, bosques muy húmedos y pluviales, bosques húmedos, bosques secos, manglares y bosques de palma. Para asignar cada parcela a un tipo de bosque se utilizó el mapa de tipos potenciales de bosque mostrado en la figura 6. Por su parte, la estratificación por área protegida consideró dos estratos: (i) área protegida, en el cual se consideraron todas las áreas silvestres protegidas presentes en Costa Rica sin importar su categoría de manejo y; (ii) área no protegida, que fueron todas las parcelas ubicadas fuera de áreas silvestres protegidas. Para estratificar por área protegida se utilizó la capa de Áreas Silvestre Protegidas de Atlas Digital de Costa Rica [27].

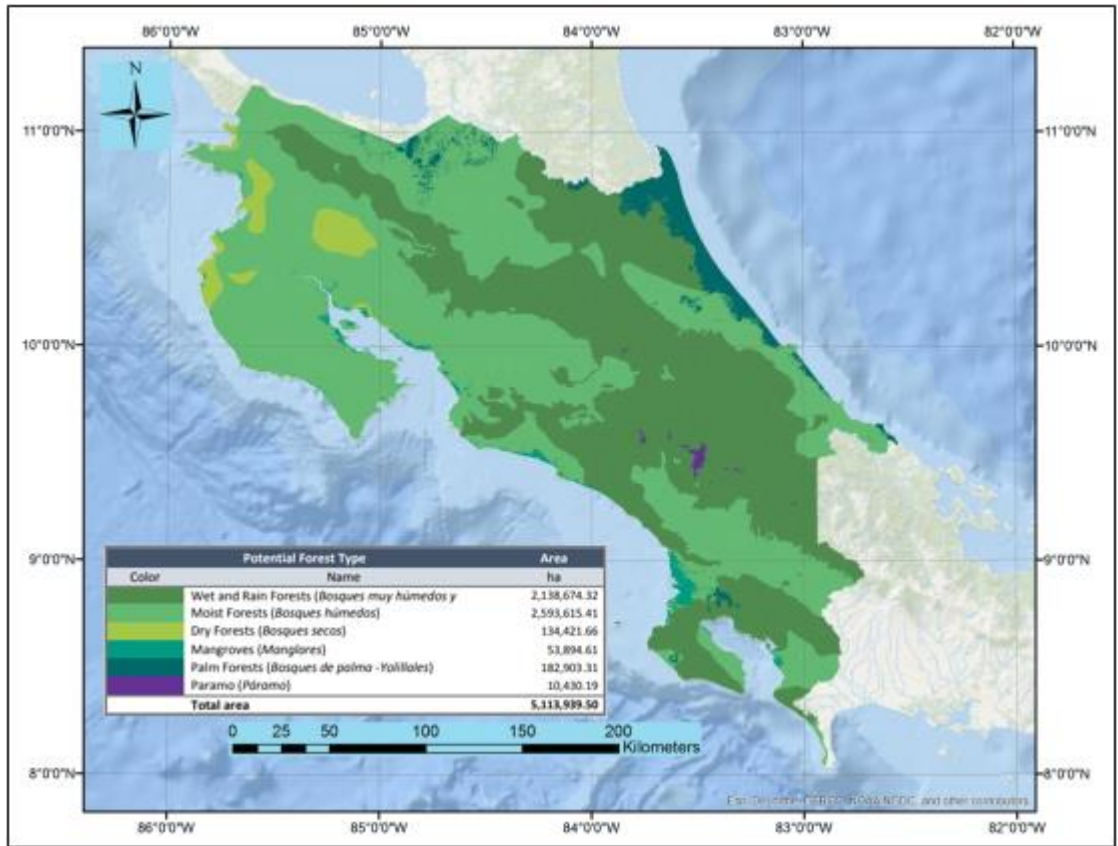


Figura 6. Mapa de tipos de bosque potenciales en Costa Rica. Fuente: [21].

Las fórmulas utilizadas para estimar las áreas de cambio, sus errores y límites de confianza asociados fueron:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (17)$$

$$A_i = A * p_i \quad (18)$$

$$S_{Ai} = \sqrt{\frac{p_i * (1 - p_i)}{N}} * A \quad (19)$$

$$E_{Ai} = S_{Ai} * 1,96 \quad (20)$$

$$E(\%)_{Ai} = \frac{E_{Ai}}{A_i} * 100 \quad (21)$$

$$Li_i = A_i - E_{Ai} \quad (22)$$

$$LS_i = A_i + E_{Ai} \quad (23)$$

Donde:

p_i = proporción de puntos de la clase de cambio i .

n_i = cantidad de unidades de muestreo pertenecientes a la clase de cambio i .

N = cantidad total de unidades de muestreo.

A_i = área de la clase de cambio i en ha.

A = área total de estudio = 5 113 939,5 ha.

S_{A_i} = error estándar de la estimación del área de la clase de cambio i .

E_{A_i} = error absoluto de la estimación del área de la clase de cambio i con una confiabilidad de 95 %.

$E(\%)_{A_i}$ = error relativo de la estimación del área de la clase de cambio i con una confiabilidad de 95 %.

L_i = Límite inferior de confianza al 95 % para la clase de cambio i .

Ls_i = Límite superior de confianza al 95 % para la clase de cambio i .

3. Resultados y discusión

3.1 Evaluación de consistencia de los datos

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación de la consistencia de los datos mediante los dos recursos utilizados: la prueba t de student para medias de observaciones pareadas y el uso de matrices de confusión.

3.1.1 Prueba t de student para medias de observaciones pareadas

La prueba t de student realizada para las medias de las evaluaciones 1 y 2 de uso de la tierra, señala que, a nivel de categoría, existen mayores diferencias para el año 2013 que para el 2015 (cuadro 4). Para 2013, existe diferencia significativa (95 %) en las categorías de tierras forestales, agricultura, infraestructura y otras tierras, mientras que para el año 2015 solo existe diferencia en las categorías de otras tierras y zona húmedas (cuadro 5). Probablemente, el hecho de que exista mayor cantidad de diferencias significativas para el 2013 se debe a la desigualdad en el rango de fechas utilizado para este año, lo cual puede provocar que en muchas ocasiones se evalúen años distintos.

Cuadro 4. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de uso del suelo en Costa Rica a nivel de categoría para el año 2013.

| Categoría de uso | X ₁ | X ₂ | df | S _d | t _c | Valor p |
|--------------------|----------------|----------------|------|----------------|----------------|---------|
| Tierras forestales | 56,60 | 59,23 | 2,64 | 22,98 | 3,66 | <0,001 |
| Agricultura | 11,39 | 9,63 | 1,76 | 18,40 | 3,05 | 0,002 |
| Pastos | 25,98 | 27,59 | 1,61 | 27,59 | 1,86 | 0,063 |
| Zonas húmedas | 0,87 | 1,16 | 0,29 | 7,04 | 1,32 | 0,187 |
| Infraestructura | 2,82 | 1,76 | 1,07 | 8,73 | 3,90 | <0,001 |
| Otras tierras | 2,34 | 0,63 | 1,71 | 12,12 | 4,50 | <0,001 |

Cuadro 5. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de uso del suelo en Costa Rica a nivel de categoría para el año 2015.

| Categoría de uso | X ₁ | X ₂ | d _f | S _d | t _c | Valor p |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
| Tierras forestales | 58,48 | 59,42 | 0,94 | 20,73 | 1,45 | 0,147 |
| Agricultura | 10,44 | 9,69 | 0,75 | 17,23 | 1,39 | 0,165 |
| Pastos | 26,99 | 26,96 | 0,03 | 23,64 | 0,04 | 0,971 |
| Zonas Húmedas | 0,58 | 1,18 | 0,60 | 7,56 | 2,52 | 0,012 |
| Infraestructura | 1,94 | 2,07 | 0,13 | 4,12 | 0,99 | 0,322 |
| Otras tierras | 1,57 | 0,68 | 0,89 | 7,54 | 3,77 | <0,001 |

Al llevar los bosques a nivel de subcategoría, en los cuadros 6 y 7 se puede observar que existe diferencia significativa en las subcategorías bosque maduro y bosque secundario inclusive para el año 2015 donde la categoría de tierras forestales no presentaba diferencias significativas. Por su parte, las categorías de manglar, yolillal y plantación forestal son estadísticamente iguales en ambos años. Esto sugiere que el reto al identificar la vegetación forestal ocurre a la hora de distinguir las subcategorías de bosque maduro y bosque secundario.

Cuadro 6. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de las subcategorías de tierras forestales en Costa Rica para el año 2013.

| Categoría de uso | X ₁ | X ₂ | d _f | S _d | t _c | Valor p |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
| Bosque maduro | 37,43 | 43,99 | 6,56 | 30,98 | 6,75 | <0,001 |
| Bosque secundario | 14,72 | 9,75 | 4,96 | 32,23 | 4,91 | <0,001 |
| Manglar | 0,68 | 0,85 | 0,17 | 3,90 | 1,41 | 0,158 |
| Yolillal | 0,71 | 1,24 | 0,54 | 9,44 | 1,81 | 0,070 |
| Plantación forestal | 3,06 | 3,39 | 0,33 | 14,03 | 0,75 | 0,453 |

Cuadro 7. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de las subcategorías de tierras forestales en Costa Rica para el año 2015.

| Categoría de uso | X ₁ | X ₂ | d _f | S _d | t _c | Valor p |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
| Bosque maduro | 31,44 | 43,89 | 12,44 | 32,57 | 12,18 | <0,001 |
| Bosque secundario | 22,06 | 10,21 | 11,84 | 36,00 | 10,49 | <0,001 |
| Manglar | 0,73 | 0,85 | 0,12 | 3,58 | 1,10 | 0,270 |
| Yolillal | 0,96 | 1,25 | 0,29 | 8,32 | 1,11 | 0,268 |
| Plantación forestal | 3,29 | 3,22 | 0,07 | 14,15 | 0,16 | 0,877 |

Para las tierras no forestales, en 2013 se encontraron diferencias significativas entre las medias de 6 subcategorías, a saber: cultivos anuales, cultivos permanentes, áreas agrícolas heterogéneas, zona urbana discontinua, otras tierras, nubes y sin información. Mientras que en 2015 existen diferencias solamente en las subcategorías de zona urbana discontinua, red vial, laguna y nubes.

3.1.2 Matrices de error

En cuanto la evaluación de consistencia por medio de matrices de error bajo distintos escenarios⁵ se obtuvo que, utilizando todos los datos (escenario 1), la consistencia global fue de 73 % para los datos de 2013 (ver cuadro 8) y de 69 % para los de 2015 (ver cuadro 9). Al utilizar únicamente los datos con información de imágenes de alta resolución (escenario 2), la consistencia de los datos de 2013, contrario a lo esperado, decreció a un 68% (ver cuadro 10), mientras que para el 2015, sí respondieron como se esperaba y aumentó la consistencia global a 70% (ver cuadro 11). Al agrupar las tierras forestales en una única categoría de bosque (escenario 3) la consistencia global aumentó contundentemente a 85 y 87 % para 2013 (cuadro 12) y 2015 (cuadro 13) respectivamente.

En la figura 7, se puede observar de manera gráfica las variaciones en la consistencia bajo los distintos escenarios anteriormente mencionados.

⁵ Escenarios de evaluación de consistencia: escenario 1 = conjunto total de datos; escenario 2 = grupo de datos con información de imágenes de alta resolución; escenario 3 = conjunto total de datos, manteniendo las tierras forestales a nivel de categoría.

Cuadro 8. Proporción de datos y consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2013.

| Clase de uso | P_i | CU_i | P_j | CP_j |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Bosque maduro | 0,395 | 0,913 | 0,465 | 0,775 |
| Bosque secundario | 0,169 | 0,401 | 0,110 | 0,616 |
| Manglar | 0,007 | 1,000 | 0,009 | 0,778 |
| Yolillal | 0,007 | 0,714 | 0,012 | 0,417 |
| Plantación forestal | 0,032 | 0,697 | 0,038 | 0,590 |
| Cultivos anuales | 0,065 | 0,561 | 0,042 | 0,860 |
| Cultivos permanentes | 0,034 | 0,914 | 0,052 | 0,604 |
| Áreas agrícolas heterogéneas | 0,009 | 0,000 | 0,000 | - |
| Cultivos confinados | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Pastos | 0,234 | 0,811 | 0,247 | 0,769 |
| Embalse | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Río | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Canal | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Laguna | 0,004 | 0,500 | 0,007 | 0,286 |
| Zona urbana continua | 0,009 | 0,556 | 0,008 | 0,625 |
| Zona urbana discontinua | 0,012 | 0,000 | 0,001 | 0,000 |
| Zonas verdes urbanas | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Instalaciones recreativas | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Playas y arenales | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Playón | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Otro terreno descubierto | 0,007 | 0,286 | 0,003 | 0,667 |
| Páramo | 0,003 | 0,333 | 0,001 | 1,000 |
| Nubes | 0,004 | 0,000 | 0,000 | - |
| Sin información | 0,004 | 0,000 | 0,000 | - |
| CG | | 0,732 | | |

P_i = proporción de datos asignados a la clase de uso i en la evaluación 1; P_j = proporción de datos asignados a la clase de uso j en la evaluación 2; CU_i = consistencia del usuario en la clase i; CP_j = consistencia del productor en la clase j.

Cuadro 9. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2015.

| Clase de uso | P_i | CU_i | P_j | CP_j |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Bosque maduro | 0,331 | 0,935 | 0,478 | 0,646 |
| Bosque secundario | 0,261 | 0,298 | 0,116 | 0,669 |
| Manglar | 0,008 | 1,000 | 0,009 | 0,889 |
| Yolillal | 0,009 | 0,778 | 0,013 | 0,538 |
| Plantación forestal | 0,034 | 0,629 | 0,036 | 0,595 |
| Cultivos anuales | 0,042 | 0,767 | 0,042 | 0,767 |
| Cultivos permanentes | 0,054 | 0,800 | 0,051 | 0,846 |
| Áreas agrícolas heterogéneas | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Cultivos confinados | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Pasto | 0,235 | 0,774 | 0,226 | 0,804 |
| Embalse | 0,002 | 0,000 | 0,000 | - |
| Río | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Canal | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Laguna | 0,001 | 0,000 | 0,007 | 0,000 |
| Zona urbana continua | 0,005 | 1,000 | 0,009 | 0,556 |
| Zona urbana discontinua | 0,003 | 0,000 | 0,002 | 0,000 |
| Aeropuerto | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Zona industrial comercial | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Instalaciones recreativas | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Playón | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Otro terreno descubierto | 0,005 | 0,400 | 0,003 | 0,667 |
| Páramo | 0,002 | 0,500 | 0,001 | 1,000 |
| Nubes | 0,002 | 0,000 | 0,000 | - |
| CG | | | 0,693 | |

P_i = proporción de datos asignados a la clase de uso i en la evaluación 1; P_j =

proporción de datos asignados a la clase de uso j en la evaluación 2; CU_i =

consistencia del usuario en la clase i; CP_j = consistencia del productor en la clase j.

Cuadro 10. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2013, utilizando únicamente imágenes de alta resolución.

| Clase de uso | P_i | CU_i | P_j | CP_j |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Bosque maduro | 0,319 | 0,872 | 0,407 | 0,683 |
| Bosque secundario | 0,209 | 0,407 | 0,134 | 0,633 |
| Manglar | 0,008 | 1,000 | 0,010 | 0,833 |
| Yolillal | 0,000 | - | 0,003 | 0,000 |
| Plantación forestal | 0,037 | 0,682 | 0,044 | 0,577 |
| Cultivos anuales | 0,093 | 0,582 | 0,061 | 0,889 |
| Cultivos permanentes | 0,034 | 0,900 | 0,059 | 0,514 |
| Áreas agrícolas heterogéneas | 0,014 | 0,000 | 0,000 | - |
| Cultivos confinados | 0,000 | - | 0,002 | 0,000 |
| Pastos | 0,233 | 0,818 | 0,255 | 0,747 |
| Embalse | 0,002 | 0,000 | 0,000 | - |
| Laguna | 0,000 | - | 0,005 | 0,000 |
| Zona urbana continua | 0,015 | 0,556 | 0,014 | 0,625 |
| Zona urbana discontinua | 0,019 | 0,000 | 0,000 | - |
| Zonas verdes urbanas | 0,002 | 0,000 | 0,000 | - |
| Instalaciones recreativas | 0,000 | - | 0,002 | 0,000 |
| Otro terreno descubierto | 0,008 | 0,400 | 0,003 | 1,000 |
| Nubes | 0,003 | 0,000 | 0,000 | - |
| Sin información | 0,003 | 0,000 | 0,000 | - |
| CG | | | 0,684 | |

P_i = proporción de datos asignados a la clase de uso i en la evaluación 1; P_j =

proporción de datos asignados a la clase de uso j en la evaluación 2; CU_i =

consistencia del usuario en la clase i; CP_j = consistencia del productor en la clase j.

Cuadro 11. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2015, utilizando únicamente imágenes de alta resolución.

| Clase de uso | P_i | CU_i | P_j | CP_j |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Bosque maduro | 0,326 | 0,945 | 0,477 | 0,645 |
| Bosque secundario | 0,261 | 0,540 | 0,121 | 0,687 |
| Manglar | 0,007 | 0,000 | 0,008 | 0,875 |
| Yolillal | 0,009 | 0,111 | 0,009 | 0,778 |
| Plantación forestal | 0,036 | 0,118 | 0,038 | 0,611 |
| Cultivos anuales | 0,043 | 0,000 | 0,043 | 0,805 |
| Cultivos permanentes | 0,056 | 0,075 | 0,053 | 0,860 |
| Areas agrícolas heterogéneas | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Cultivos confinados | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 1,000 |
| Pasto | 0,238 | 0,080 | 0,224 | 0,817 |
| Embalse | 0,002 | 0,000 | 0,000 | - |
| Río | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 1,000 |
| Laguna | 0,000 | - | 0,009 | 0,000 |
| Zona urbana continua | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,556 |
| Zona urbana discontinua | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Zona industrial comercial | 0,001 | 0,000 | 0,001 | - |
| Aeropuerto | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Instalaciones recreativas | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 1,000 |
| Playón | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 1,000 |
| Otro terreno descubierto | 0,004 | 0,000 | 0,001 | 0,667 |
| Páramo | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 1,000 |
| Nubes | 0,001 | 0,000 | 1,000 | - |
| CG | | | 0,705 | |

P_i = proporción de datos asignados a la clase de uso i en la evaluación 1; P_j =

proporción de datos asignados a la clase de uso j en la evaluación 2; CU_i =

consistencia del usuario en la clase i; CP_j = consistencia del productor en la clase j.

Cuadro 12. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2013, agrupando los bosques en una sola categoría.

| Clase de uso | P_i | CU_i | P_j | CP_j |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Bosque | 0,610 | 0,952 | 0,634 | 0,916 |
| Cultivos anuales | 0,065 | 0,561 | 0,042 | 0,860 |
| Cultivos permanentes | 0,034 | 0,914 | 0,052 | 0,604 |
| Áreas agrícolas heterogéneas | 0,009 | 0,000 | 0,000 | - |
| Cultivos confinados | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Pastos | 0,234 | 0,811 | 0,247 | 0,769 |
| Embalse | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Río | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Canal | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Laguna | 0,004 | 0,500 | 0,007 | 0,286 |
| Zona urbana continua | 0,009 | 0,556 | 0,008 | 0,625 |
| Zona urbana discontinua | 0,012 | 0,000 | 0,001 | 0,000 |
| Zonas verdes urbanas | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Instalaciones recreativas | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Playas y arenales | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Playón | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Otro terreno descubierto | 0,007 | 0,286 | 0,003 | 0,667 |
| Páramo | 0,003 | 0,333 | 0,001 | 1,000 |
| Nubes | 0,004 | 0,000 | 0,000 | - |
| Sin información | 0,004 | 0,000 | 0,000 | - |
| CG | | 0,850 | | |

P_i = proporción de datos asignados a la clase de uso i en la evaluación 1; P_j =

proporción de datos asignados a la clase de uso j en la evaluación 2; CU_i =

consistencia del usuario en la clase i; CP_j = consistencia del productor en la clase j.

Cuadro 13. Consistencia del usuario y del productor para las clases de uso de suelo evaluadas en Costa Rica al año 2015, agrupando los bosques en una sola categoría.

| Clase de uso | P_i | CU_i | P_j | CP_j |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Bosque | 0,643 | 0,939 | 0,653 | 0,925 |
| Cultivos anuales | 0,042 | 0,767 | 0,042 | 0,767 |
| Cultivos permanentes | 0,054 | 0,800 | 0,051 | 0,846 |
| Áreas agrícolas heterogéneas | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Cultivos confinados | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Pasto | 0,235 | 0,774 | 0,226 | 0,804 |
| Embalse | 0,002 | 0,000 | 0,000 | - |
| Río | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Canal | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Laguna | 0,001 | 0,000 | 0,007 | 0,000 |
| Zona urbana continua | 0,005 | 1,000 | 0,009 | 0,556 |
| Zona urbana discontinua | 0,003 | 0,000 | 0,002 | 0,000 |
| Aeropuerto | 0,001 | 0,000 | 0,000 | - |
| Zona industrial comercial | 0,000 | - | 0,001 | 0,000 |
| Instalaciones recreativas | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Playón | 0,001 | 1,000 | 0,001 | 1,000 |
| Otro terreno descubierto | 0,005 | 0,400 | 0,003 | 0,667 |
| Páramo | 0,002 | 0,500 | 0,001 | 1,000 |
| Nubes | 0,002 | 0,000 | 0,000 | - |
| CG | | 0,8730 | | |

P_i = proporción de datos asignados a la clase de uso i en la evaluación 1; P_j =

proporción de datos asignados a la clase de uso j en la evaluación 2; CU_i =

consistencia del usuario en la clase i; CP_j = consistencia del productor en la clase j.

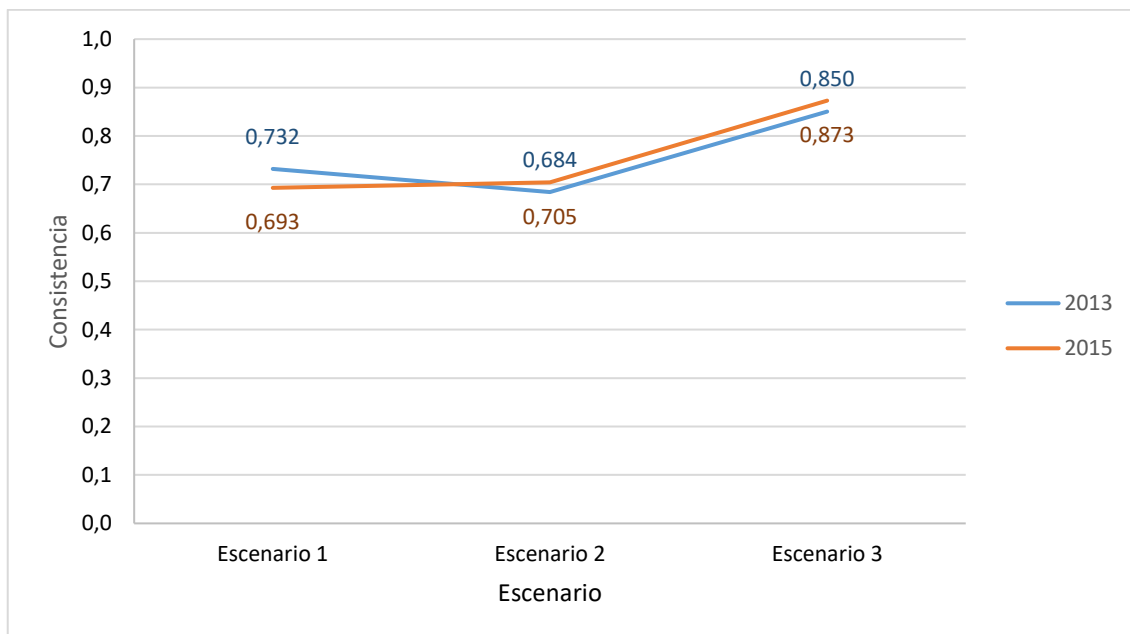


Figura 7. Variación de la consistencia global entre evaluaciones bajo 3 distintos escenarios, donde: Escenario 1 = comparación de todos los datos; Escenario 2 = comparación de únicamente el grupo de datos con información de imágenes de alta resolución; Escenario 3 = comparación de todos los datos agrupando las tierras forestales en una única categoría de bosque.

La consistencia obtenida entre las evaluaciones por medio de matrices de error se puede considerar pobre. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que estas evaluaciones fueron llevadas a cabo por profesionales forestales, pero no específicamente expertos en evaluación visual multitemporal o en interpretación de uso de la tierra. A diferencia de este estudio, Straume [28] utilizó 5 intérpretes con alta experiencia y habilidad, y logró obtener consistencias superiores al 90 %, por lo cual se puede inferir que la poca experiencia de los evaluadores influyó negativamente en la consistencia de los datos.

Según Phillipson [29], la interpretación de fotos aéreas para estudiar la dinámica de la cobertura de la tierra es una práctica que depende del entrenamiento, la experiencia, el sesgo y las habilidades visuales y analíticas del operador, a lo cual llama “marco perceptual del intérprete”. A pesar de esto, los resultados obtenidos son comparables con lo mostrado por Powell et al. [30] en donde cinco intérpretes

discreparon en casi un 30 % de las unidades de muestreo, en este caso debido a subjetividad en el etiquetado de clases de uso de carácter continuo.

Al analizar la consistencia bajo el escenario 2 (únicamente los datos con información de imágenes de alta resolución) se esperaba que la consistencia aumentara ya que en estas se pueden distinguir de mejor manera los usos. Sin embargo, en uno de los años de evaluación la consistencia decreció, lo que sugiere que la resolución de las imágenes no es exactamente el problema en este caso. Por otra parte, al mantener las tierras forestales a nivel de categoría, la consistencia global aumenta drásticamente. Estos resultados, en combinación con el análisis de comparación de medias, sustentan que la discrepancia entre evaluadores proviene, en gran medida, a la hora de distinguir las tierras forestales principalmente bosque maduro y secundario que juntas representan la mayor proporción de datos.

En un estudio realizado por Lunetta et al. [31] se determinaron fuentes de variación entre intérpretes a la hora de realizar EVM que presentan similitudes con fuentes de variación encontradas en este estudio, por ejemplo: para la clase de “praderas” se obtuvo una concordancia entre intérpretes de 66% principalmente debido a la confusión de estas con bosques; y para la clase de uso “Urbano” hubo confusión entre mediana densidad y baja densidad y entre baja densidad y “césped cuidado”. Estas confusiones son respectivamente similares a las obtenidas en este estudio entre bosque (principalmente bosque secundario) y pastos; y las confusiones de zona urbana discontinua con zona urbana continua y pastos.

Straume [28] expone que los grandes desafíos a la hora de obtener interpretaciones de cobertura de la tierra consistentes son: (i) diferenciar entre clases estrechamente relacionadas y (ii) definir límites entre clases de uso con transiciones graduales. Con referencia al desafío ii, el autor explica que existen clases de uso en donde la transición entre una y otra es gradual o tienen límites difusos entre sí, y que estos límites pueden existir tanto físicamente en el terreno como en la mente de los evaluadores.

En este estudio, se encontraron varias confusiones entre clases que se pueden asociar a lo manifestado en el párrafo anterior, por ejemplo: confusión entre yolillal y bosque maduro, que puede ser un caso de transiciones graduales en campo entre una clase y la otra, tal como se puede observar en el caribe de Costa Rica. Mientras que, la confusión entre bosque secundario y pastos se puede deber a un límite difuso entre estas categorías en la mente de los evaluadores, principalmente cuando se trata de bosques secundarios en sus primeras instancias de sucesión. De igual manera, la confusión entre zona urbana continua y zona urbana discontinua encontrada en este estudio se puede asociar a una transición gradual entre clases en la mente del evaluador. Por otra parte, la confusión entre clases estrechamente relacionadas se manifestó en este estudio entre las clases cultivos anuales y cultivos permanentes.

Como se mencionó anteriormente, la confusión entre bosque maduro y bosque secundario es la mayor fuente de inconsistencia de los datos en este estudio debido a la alta proporción de datos asignados a estas clases en conjunto con la proporción que se confunden entre sí. Si bien estas clases están relacionadas, el protocolo establece cómo diferenciarlas considerando la edad del bosque y por ende el error podría ser debido a falta de capacitación o de apego al protocolo, sin embargo, podría considerarse que se debe a una transición gradual entre las clases ya que el momento en que un sitio pasa a ser bosque no es claro, sino que es confuso y por ende se dificulta saber la edad exacta del bosque.

Otros dos casos encontrados en este estudio que resultan particularmente difíciles son las confusiones entre pastos y cultivos anuales ya que se torna difícil distinguir un pasto de un cultivo de gramíneas como el arroz o el maíz; y la confusión entre plantación forestal y bosque secundario. Para estos casos podría ser útil el uso información auxiliar, o el apoyo entre evaluadores para determinar el uso.

Diversos autores [5], [9], [32] indican que los errores en la interpretación o medición se pueden reducir incorporando un apropiado proceso de control de calidad y

garantía de la calidad (QA/QC por sus siglas en inglés), lo cual además está incluido como una buena práctica en las orientaciones del IPCC para mejorar la transparencia, consistencia, comparabilidad y exhaustividad de los datos, así como su precisión y exactitud. Pearson et al. [33] indica que como parte del QA/QC el equipo de trabajo debe recibir un entrenamiento extensivo para calibrar las observaciones y dejar claros los procedimientos para coleccionar datos certeros, y además indica que típicamente estos programas deben incluir tres tipos de chequeos: supervisión del personal evaluador por parte de un experto para la identificación y corrección de errores (*“hot checks”*), chequeos aleatorios de una parte de las interpretaciones por parte de personal externo, sin la presencia del personal evaluador (*“cold checks”*) y; chequeos de la replicabilidad de los datos (*“blind checks”*).

Al evaluar la consistencia para cada uno de los grupos de muestreo, se obtuvo un valor máximo de 89 % para el grupo 9 en el año 2013 y un valor mínimo de 43 % para el grupo 6 al año 2015 (cuadro 14). La variación promedio entre grupos de la consistencia entre evaluaciones fue de 13% para 2013 y de 15% para 2015.

Cuadro 14. Consistencia global por grupo de muestreo por año.

| Grupo | CG | |
|-------|------|------|
| | 2013 | 2015 |
| 1 | 0,74 | 0,70 |
| 2 | 0,60 | 0,72 |
| 3 | 0,80 | 0,69 |
| 4 | 0,79 | 0,80 |
| 5 | 0,73 | 0,44 |
| 6 | 0,74 | 0,43 |
| 7 | 0,56 | 0,67 |
| 8 | 0,84 | 0,88 |
| 9 | 0,89 | 0,67 |
| 10 | 0,51 | 0,82 |
| 11 | 0,82 | 0,65 |
| 12 | 0,73 | 0,79 |

Estos resultados, no permiten dictaminar si hay variación inherente a la región de evaluación ya que si bien hay grupos en los que la consistencia es alta en ambos años como los grupos 4 y 8 o donde la consistencia es baja en ambos años como el 7, hay otros grupos en donde la consistencia varía mucho entre un año y otro como por ejemplo el grupo 9 que pasa de ser el grupo con más consistencia en 2013 con un 89% a tener tan solo un 67% de consistencia en 2015 por lo que este análisis sugiere que las variaciones se deben a las diferencias en el “marco perceptual del intérprete” anteriormente mencionado.

En el análisis para cambios de uso se determinó que la consistencia entre ambas evaluaciones es de 86% considerando todos los datos (cuadro 15) y del 85% si se consideran únicamente los datos con información de imágenes de alta resolución (Cuadro 16).

Cuadro 15. Proporción de área y consistencia de los datos de determinación de cambios de uso considerando todos los datos.

| Categoría de cambio | P_i | CU_i | P_j | CP_j |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Bosque estable | 0,58 | 96,41 | 0,63 | 88,82 |
| Deforestación | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Bosques nuevos | 0,06 | 14,06 | 0,03 | 32,14 |
| No bosque estable | 0,32 | 91,95 | 0,34 | 86,34 |
| Sin información | 0,01 | 0,00 | 0,00 | |
| CG | | 0,86 | | |

P_i = proporción de datos asignados a la clase de cambio de uso i en la evaluación 1;

P_j = proporción de datos asignados a la clase de uso j en la evaluación 2; CU_i =

consistencia del usuario en la clase i; CP_j = consistencia del productor en la clase j.

Cuadro 16. Proporción de área y consistencia de los datos de determinación de cambios de uso considerando únicamente los datos con información de imágenes de alta resolución.

| Categoría de cambio | P_i | CU_i | P_j | CP_j |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Bosque estable | 0,53 | 96,45 | 0,59 | 86,92 |
| Deforestación | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Nuevos bosques | 0,06 | 5,41 | 0,01 | 33,33 |
| No bosque estable | 0,36 | 93,27 | 0,39 | 85,09 |
| Sin información | 0,01 | 0,00 | 0,00 | |
| CG | | | 0,85 | |

P_i = proporción de datos asignados a la clase de cambio de uso i en la evaluación 1; P_j = proporción de datos asignados a la clase de uso j en la evaluación 2; CU_i = consistencia del usuario en la clase i; CP_j = consistencia del productor en la clase j.

Olofsson et al. [14] indica que incluso cuando se realizan clasificaciones muy exactas para ambos años, la exactitud de la clasificación de cambios puede resultar inexacta, por lo que evaluar la consistencia en los cambios de uso detectados resulta importante. En este caso la consistencia global obtenida en los datos de cambio de uso fue relativamente alta, lo cual se podría explicar debido a que una vez más se tratan todas las tierras forestales en una sola categoría y adicionalmente se tratan las tierras no forestales también en una sola categoría. Individualmente para las categorías que sí implican cambio de uso (deforestación y bosques nuevos) la consistencia fue baja, sin embargo, estos datos pueden considerarse poco concluyentes estadísticamente debido que se obtuvo una muy baja cantidad de observaciones.

3.2 Estimación de datos de actividad REDD+ para Costa Rica en el periodo 2014-2015

La obtención de datos de actividad para el sistema MRV de REDD+ CR, requiere la estimación de cambios en el uso de la tierra para determinar ganancias y pérdidas de carbono forestal en un periodo determinado. A continuación, se muestran los

resultados de estadísticas de uso de la tierra y sus variaciones entre los años 2014 y 2015, y posteriormente la estimación de áreas de cambio de uso de la tierra a diferentes niveles de especificidad para el periodo evaluado.

3.2.1 Estadísticas de uso de la tierra para el periodo 2014-2015

Los resultados de la estimación del uso de la tierra en Costa Rica para los años 2014 y 2015 utilizando dos métodos distintos, se muestran en las figuras 8 y 9 respectivamente. Estos resultados indican que, según los intervalos de confianza, existe diferencia significativa (95 %) entre la estimación del porcentaje de uso bajos ambos métodos para todas las categorías de uso a excepción de agricultura.

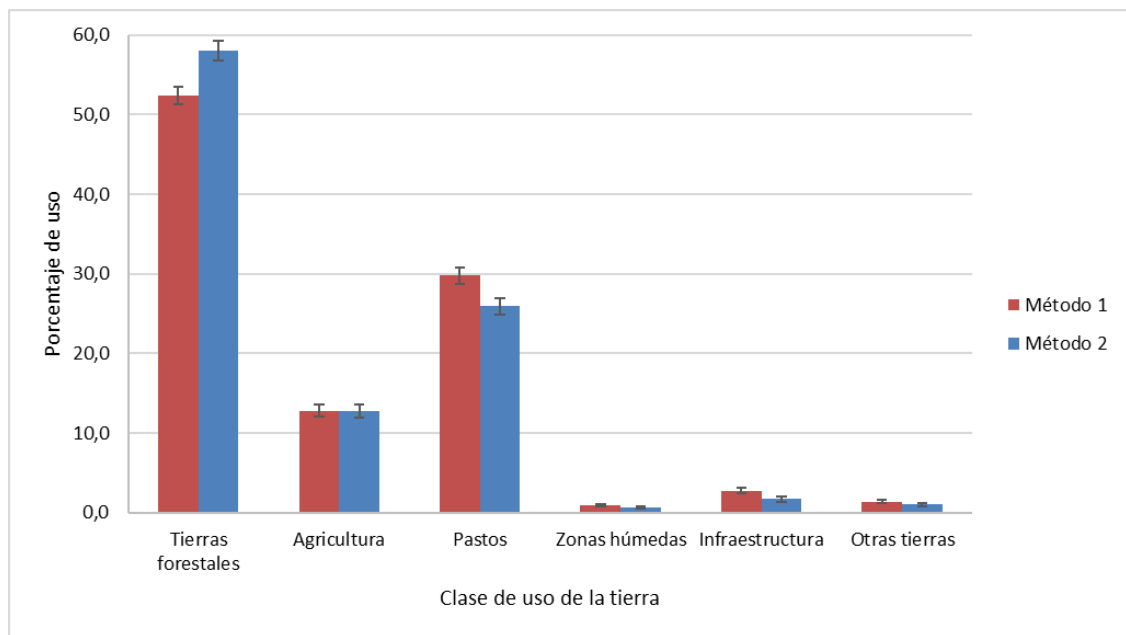


Figura 8. Estimación del uso de la tierra en Costa Rica para el año 2014 según dos distintos métodos de estimación
Método 1 = Estimación por porcentajes; Método 2 = Estimación por parcela.

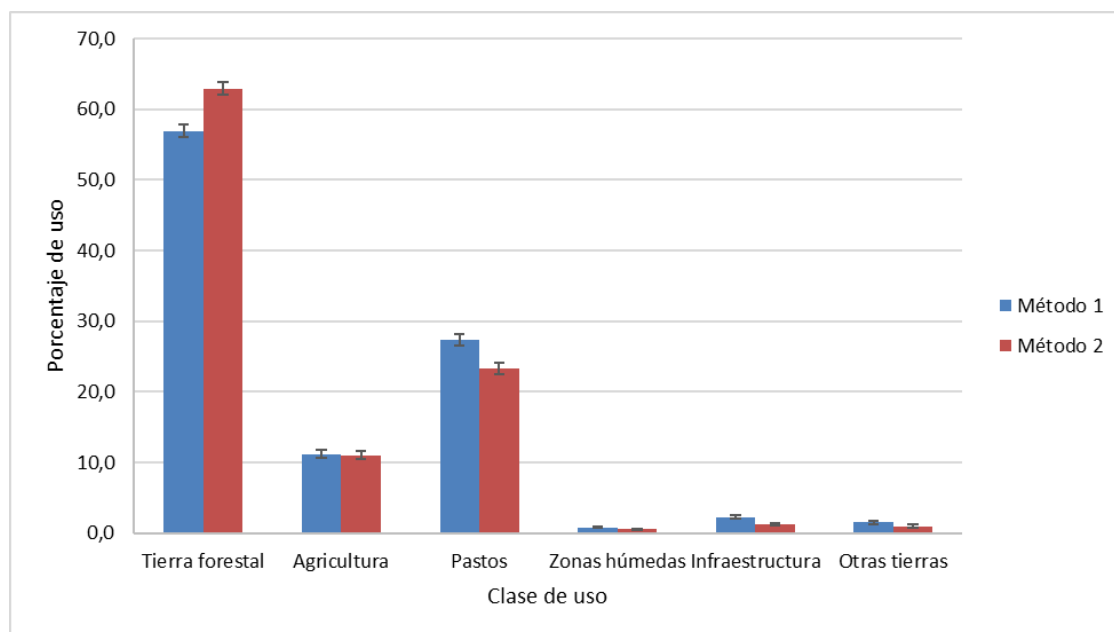


Figura 9. Estimación del uso de la tierra en Costa Rica para el año 2015 según dos distintos métodos de estimación
Método 1 = Estimación por porcentajes; Método 2 = Estimación por parcela.

Las diferencias entre ambos métodos observadas en las figuras 8 y 9, obedecen a que el método de estimación por porcentajes considera los datos de uso como una variable continua mientras que el método de estimación por parcela transforma la variable continua a una variable discreta, lo cual ocasiona una pérdida de información. Por su parte, los errores relativos obtenidos en ambos años (figuras 10 y 11) son en ambos años sumamente similares para las categorías de tierras forestales y agricultura, moderadamente similares para pastos y resultan muy distintos para zonas húmedas, infraestructura y otras tierras. Como se puede apreciar, las categorías de uso con menor presencia son las que presentan más diferencia en cuanto al error ya que la pérdida de información bajo el método de estimación por parcela genera que los errores en estas clases de poca presencia se acentúen, por lo que el método de estimación por porcentajes resulta más preciso, sin embargo, un inconveniente de este método es que dificulta la estimación de cambios de uso debido a las múltiples opciones posibles, haciendo prácticamente imposible la determinación de cambios de uso requeridos en el MRV diseñado para REDD+ Costa Rica.

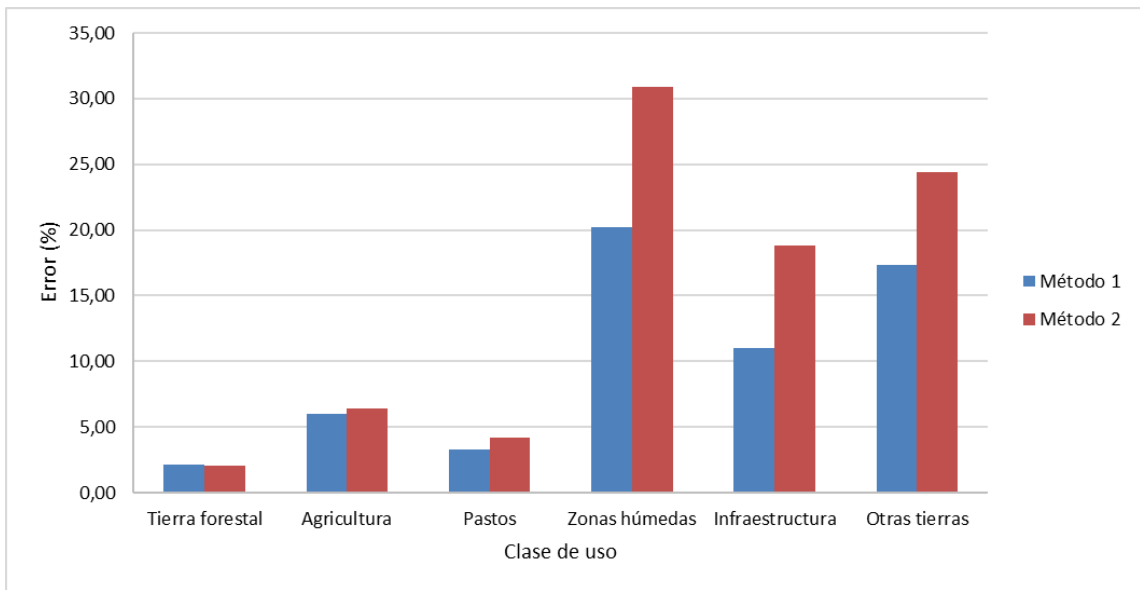


Figura 10. Error relativo de la estimación de porcentajes de uso de la tierra en Costa Rica para el año 2014 bajo dos distintos métodos de estimación. Método 1 = estimación por porcentajes; método 2 = estimación por parcela.

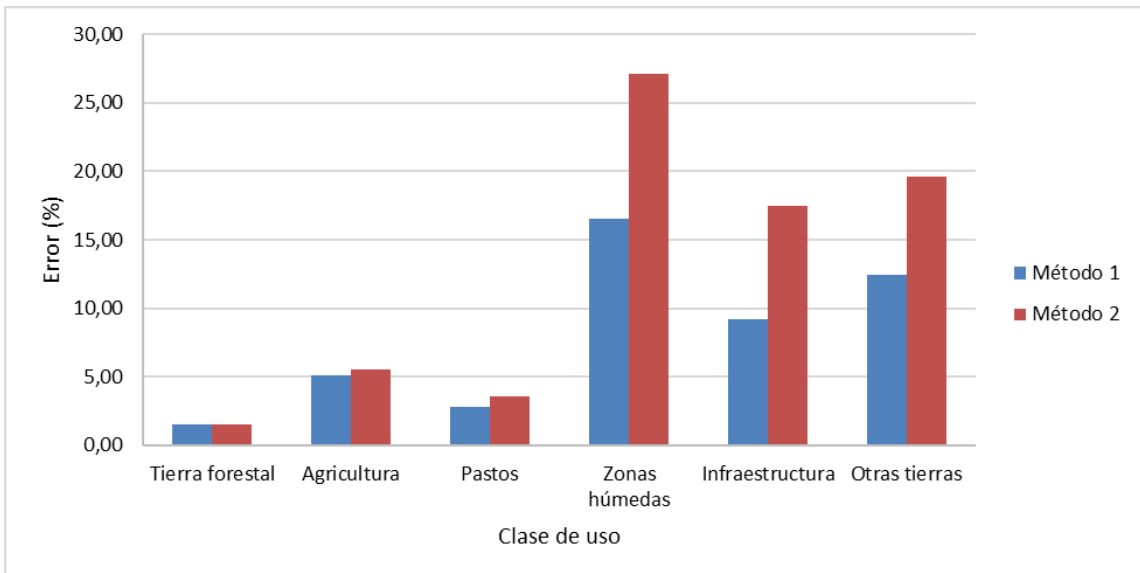


Figura 11. Error relativo de la estimación de porcentajes de uso de la tierra en Costa Rica para el año 2015 bajo dos distintos métodos de estimación. Método 1 = estimación por porcentajes; método 2 = estimación por parcela.

Luego, al examinar las estimaciones de uso de la tierra en el periodo 2014-2015 bajo el método de estimación por porcentajes, se obtuvo que el mayor uso de la tierra en Costa Rica son las tierras forestales con un porcentaje de uso de 52,4 % en 2014 (figura 8) y luego un 56,9 % en 2015 (figura 9). Después de las tierras forestales, las categorías de uso con mayor porcentaje son los pastos y la agricultura.

El porcentaje obtenido para el uso de tierras forestales en 2014 es igual que el porcentaje de cobertura boscosa reportado en la cartografía del Inventario Forestal Nacional para el año 2013 (52,4 %) [25], y ligeramente distinto, pero estadísticamente igual, según los intervalos de confianza obtenidos, al porcentaje reportado en el IFN 2014-2015 (51,8 %) [34].

Es importante notar que la tendencia de aumento de la cobertura boscosa en Costa Rica se refleja en estas estimaciones, sin embargo, al observar las subcategorías de las tierras forestales se puede apreciar una irregularidad en el comportamiento de la clase de bosque maduro la cual aumenta de un 26,5 a un 30,3 % (Figura 12). Este aumento podría ser producto de que en los datos del año 2014 existen 3 792 puntos de muestreo que no presentan información, y más de la mitad de estos datos corresponden a puntos para los cuales en 2015 se asignó más de un 30% de bosque maduro. Aunado a esto, el porcentaje de uso de la clase bosque maduro estimado para 2015 es igual al reportado en el IFN 2014-15 (30,3 %) [34] por lo que se podría especular que el dato obtenido en el presente trabajo para 2015 es el más preciso.

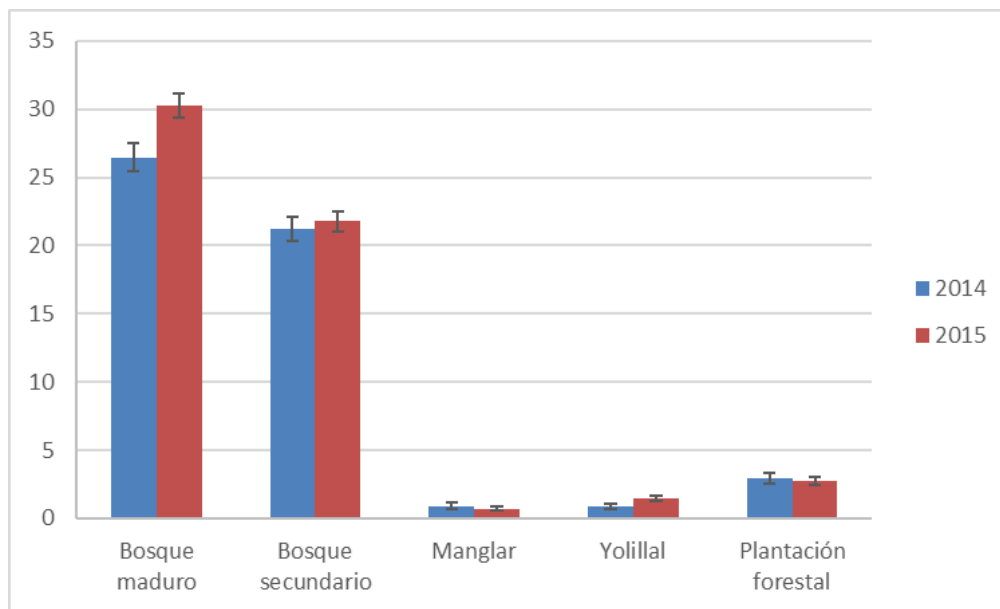


Figura 12. Porcentaje de uso a nivel de subcategorías para tierras forestales en Costa Rica para los años 2014 y 2015.

Al observar las demás subcategorías de bosque (figura 12), se aprecia un aumento en bosque secundario (21,2 a 21,8 %), y yolillal (0,9 a 1,5 %) y una disminución en las clases de manglar (0,9 a 0,7 %) y plantación forestal (2,9 a 2,7%), aunque la única que presenta diferencias estadísticamente significativas (95 %) según los intervalos de confianza, es bosque de palmas además de bosque maduro.

Lo anterior, concuerdan con la tendencia en las tierras forestales en Costa Rica indicada por Barquero y Hernández [35] quienes señalan que de 1992 a 2013 se dio un incremento sustancial en el área cubierta por bosque maduro y bosque secundario, sin embargo, ocurrió una disminución de ecosistemas importantes como los manglares. Y en cuanto a las plantaciones forestales, FAO [36] indica que la superficie de estas tierras en Costa Rica ha disminuido, debido a que una vez que se aprovechan no se vuelven a plantar y se utilizan para otros fines tales como cultivos de fruta o desarrollo urbano, además de que, existe una imposibilidad actual de la madera nacional de competir con la madera importada. Los porcentajes de uso de las subcategorías de las tierras de uso no forestal se presentan en el cuadro 17.

Cuadro 17. Porcentajes de uso de la tierra y error de la estimación para las tierras no forestales en Costa Rica para los años 2014 y 2015.

| Clase de uso | 2014 | | 2015 | |
|------------------------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Promedio | Error (95%) | Promedio | Error (95%) |
| Cultivos anuales | 4,7 | 10,3 | 4,7 | 8,1 |
| Cultivos permanentes | 7,8 | 7,9 | 6,4 | 6,9 |
| Áreas agrícolas heterogéneas | 0,2 | 48,6 | 0,1 | 48,0 |
| Cultivos confinados | 0,01 | 142,2 | 0,02 | 90,3 |
| Pastos | 29,8 | 3,3 | 27,3 | 2,8 |
| Embalse | 0,3 | 44,9 | 0,2 | 40,3 |
| Río | 0,4 | 25,4 | 0,4 | 19,8 |
| Canal | 0,01 | 69,6 | 0,01 | 64,9 |
| Estanque de acuicultura | 0,02 | 127,1 | 0,02 | 132,2 |
| Laguna | 0,1 | 69,8 | 0,1 | 50,1 |
| Océanos y mares | 0,1 | 96,4 | 0,04 | 84,8 |
| Estero | 0,1 | 75,1 | 0,05 | 73,1 |
| Laguna costera | 0,03 | 123,8 | 0,02 | 109,1 |
| Zona urbana continua | 0,7 | 25,0 | 0,4 | 24,2 |
| Zona urbana discontinua | 0,9 | 18,1 | 0,7 | 15,7 |
| Zona industrial comercial | 0,2 | 50,0 | 0,1 | 45,5 |
| Red vial | 0,9 | 8,5 | 0,9 | 6,9 |
| Red ferroviaria | 0,002 | 196,0 | 0,005 | 154,2 |
| Aeropuertos | 0,02 | 196,0 | 0,02 | 138,6 |
| Zona de extracción minera | 0,001 | 196,0 | 0,001 | 196,0 |
| Salinas | 0,03 | 120,9 | 0,02 | 120,9 |
| Zonas verdes urbanas | 0,04 | 55,9 | 0,02 | 52,9 |
| Instalaciones recreativas | 0,1 | 66,8 | 0,1 | 66,4 |
| Playas | 0,1 | 65,7 | 0,1 | 56,8 |
| Playón | 0,2 | 33,9 | 0,2 | 28,2 |
| Otro terreno descubierto | 0,4 | 31,3 | 0,6 | 20,7 |
| Páramo | 0,2 | 53,4 | 0,2 | 41,0 |
| Sombras | 0,04 | 73,8 | 0,1 | 47,7 |
| Nubes | 0,3 | 38,7 | 0,3 | 24,4 |
| Sin información | 0,1 | 66,0 | 0,04 | 71,5 |

En el cuadro 17 se puede apreciar que los usos no forestales con mayor presencia en país fueron los pastos, seguidos por cultivos anuales y cultivos agrícolas. Estos tres usos decrecieron de un año a otro. Se puede observar también que los errores

tienen una relación directa con el porcentaje de uso, de manera que las categorías que se observan en menor cantidad son las que mayores errores ostentan.

3.2.2 Estimación de cambios de uso de la tierra y actividades REDD+ para Costa Rica en el periodo 2014-2015

En la estimación según las categorías generales de cambio de REDD+ las áreas variaron considerablemente según los distintos escenarios evaluados (ver sección 2.4.2), tal como se puede observar en el cuadro 18.

Cuadro 18. Estimación del área y límites de confianza para los cambios de uso de REDD+ en Costa Rica en el periodo 2014-2015, bajo distintos escenarios⁶.

| Escenario ⁶ | Cambio | n _i | p _i | A _i | E(%) | Li | Ls |
|------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|------|-------------|-------------|
| Escenario 1 | F-N | 41 | 0,4 | 20 624,8 | 30,5 | 14 324,3 | 26 925,3 |
| | F-F | 3 656 | 36,0 | 1 839 126,8 | 2,6 | 1 791 420,0 | 1 886 833,6 |
| | N-F | 84 | 0,8 | 42 255,6 | 21,3 | 33 256,5 | 51 254,8 |
| | N-N | 2 572 | 25,3 | 1 293 827,7 | 3,3 | 1 250 610,4 | 1 337 045,0 |
| | ND | 3 813 | 37,5 | 1 918 104,6 | 2,5 | 1 869 975,3 | 1 966 233,9 |
| Escenario 2 | F-N | 37 | 0,7 | 33 324,4 | 32,1 | 22 621,6 | 44 027,2 |
| | F-F | 3 310 | 58,3 | 2 981 179,9 | 2,2 | 2 915 592,1 | 3 046 767,8 |
| | N-F | 32 | 0,6 | 28 821,1 | 34,6 | 18 863,3 | 38 778,9 |
| | N-N | 2 284 | 40,2 | 2 057 104,2 | 3,2 | 1 991 878,0 | 2 122 330,5 |
| | ND | 15 | 0,3 | 13 509,9 | 50,5 | 6 682,0 | 20 337,8 |
| Escenario 3 | F-N | 25 | 0,5 | 25 437,4 | 39,1 | 15 490,8 | 35 384,1 |
| | F-F | 3 006 | 59,8 | 3 058 595,7 | 2,3 | 2 989 277,4 | 3 127 914,1 |
| | N-F | 21 | 0,4 | 21 367,4 | 42,7 | 12 247,5 | 30 487,3 |
| | N-N | 1 959 | 39,0 | 1 993 276,5 | 3,5 | 1 924 323,6 | 2 062 229,3 |
| | ND | 15 | 0,3 | 15 262,5 | 50,5 | 7 550,1 | 22 974,8 |
| Escenario 4 | F-N | 13 | 0,3 | 17 209,7 | 54,3 | 7 870,2 | 26 549,3 |
| | F-F | 2 270 | 58,8 | 3 005 084,8 | 2,6 | 2 925 698,5 | 3 084 471,1 |
| | N-F | 11 | 0,3 | 14 562,1 | 59,0 | 5 968,7 | 23 155,5 |
| | N-N | 1 558 | 40,3 | 2 062 520,8 | 3,8 | 1 983 408,5 | 2 141 633,0 |
| | ND | 11 | 0,3 | 14 562,1 | 59,0 | 5 968,7 | 23 155,5 |

F-N = deforestación; F-F = Bosque estable; N-F = Bosques nuevos; N-N no bosque estable; ND = Sin información.

⁶ Escenarios para la estimación de cambios de uso: escenario 1 = conjunto total de puntos de muestreo; escenario 2 = el grupo de datos con información de imágenes de alta resolución; escenario 3 = el grupo de datos con información de imágenes de alta resolución y que presentan un desplazamiento entre imágenes no mayor a 7 m.; escenario 4 = el grupo de datos con información de imágenes de alta resolución, que presentan un desplazamiento entre imágenes no mayor a 7m y cuyas fechas se encuentran en dentro del rango de enero 2012 a junio 2014 para el año 2014 y de julio 2014 a diciembre 2016 para el año 2015.

En el cuadro 18 se puede apreciar que, al excluir los datos con información de imágenes de otra resolución⁷ (escenario 2), las observaciones de la clase sin información, que eran las que se presentaban en mayor cantidad, disminuyeron de 3813 a tan solo 15 observaciones. A raíz de esto, la proporción de las otras áreas de cambio aumentó considerablemente y por ende su área, a excepción de la clase de bosques nuevos. Una posible causa de esta disminución es la eliminación de los casos en que se haya utilizado una imagen de otra resolución en 2013, en cuyo caso solo se reporta el uso de mayor porcentaje, y una de alta resolución en 2015 en parcelas que presenten más de 30% de bosque sin que sea este el mayor uso.

Al eliminar los datos que registraron un desplazamiento entre imágenes mayor a 7 m (escenario 3), el área de deforestación disminuyó en 7886,9 hectáreas, mientras que, el área de cambio de no bosque a bosque (bosques nuevos) disminuyó en 7453,6 ha, esto con respecto al escenario 2. Esto sugiere que el desplazamiento entre imágenes es un factor de error/sesgo importante en la estimación de cambios de uso. Probablemente el cambio registrado en parcelas con desplazamiento sea resultado de que no se está evaluando exactamente el mismo sitio.

Por su parte, bajo el escenario 4 las áreas que no registran cambios de uso de la tierra aumentan, tal como se esperaba, debido a que se acorta el rango de fechas en la evaluación dando paso a una menor cantidad de cambios de uso. El área de deforestación obtenida bajo el escenario 4, considerado el ideal, representa una disminución en poco más de la mitad con respecto a lo reportado en el NREF de Costa Rica [21]. El NREF indica que hubo 34 705,2 ha de deforestación total para el periodo 2012-2013 en comparación con las 17 209,7 ha obtenidas en este estudio para el periodo 2014-2015, sin embargo, es probable que gran parte de esta diferencia sea atribuible a la diferencia en las metodologías de estimación.

⁷ Imágenes de una resolución menor a las de alta resolución. En este estudio, imágenes de los satélites: Sentinel 2, Landsat 8, Landsat 7 y Landsat 5.

Bajo todos los escenarios, el error en las clases de cambio estables (bosque estable y no bosque estable) fue menor a 4 %, mientras que en las clases de deforestación y nuevos bosques dadas las pocas observaciones que se logran obtener el error resulta sumamente alto, llegando a ser mayor al 50 % en el escenario 4.

Al realizar la estratificación de las categorías generales de cambio de REDD+ por tipos de bosque (Cuadro 19), se obtuvo un área de conversión de tierras forestales a no forestales de 20 412,2 ha. Esta área se concentró en dos estratos de bosque que fueron los bosques muy húmedos y pluviales y los bosques húmedos, y presentó errores de 73,8 y 79,9 % respectivamente. El área de conversión de tierras no forestales a tierras forestales fue de 16 033,0 ha. Esta se distribuyó en 3 estratos, y su error osciló entre 79,9 % en los bosques húmedos y 195,1 % en los bosques de palma. A diferencia de estos resultados, el NREF CR [21] reporta que para el periodo 2012-2013 tanto las áreas de deforestación como las de bosques nuevos, se presentan en todos los estratos de bosque y se concentran mayormente en los bosques húmedos. Las clases de cambio estables presentaron errores entre 3,5 % hasta 55,7 % en manglares que fue el estrato con menos observaciones (52).

Cuadro 19. Áreas y límites de confianza para los cambios generales de uso REDD+ por tipo de bosque en Costa Rica para el periodo 2014-2015.

| Tipo de bosque | Clase de cambio | n _i | A _i | E(%) | Li | Ls |
|----------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------------|-------------|
| Bhp | F-N | 7 | 14 244,3 | 73,8 | 3 727,2 | 24 761,4 |
| | F-F | 785 | 1 597 392,3 | 3,5 | 1 541 174,7 | 1 653 609,9 |
| | N-F | 4 | 8 139,6 | 97,8 | 178,0 | 16 101,2 |
| | N-N | 246 | 500 584,1 | 10,9 | 445 836,9 | 555 331,3 |
| | ND | 9 | 18 314,1 | 65,1 | 6 400,2 | 30 227,9 |
| Bh | F-N | 6 | 6 167,9 | 79,9 | 1 238,4 | 11 097,4 |
| | F-F | 1283 | 1 318 909,5 | 3,8 | 1 268 314,2 | 1 369 504,7 |
| | N-F | 6 | 6 167,9 | 79,9 | 1 238,4 | 11 097,4 |
| | N-N | 1227 | 1 261 342,1 | 4,0 | 1 210 758,4 | 1 311 925,8 |
| | ND | 1 | 1 028,0 | 196,0 | -986,5 | 3 042,4 |
| Bs | F-N | | | | | |
| | F-F | 67 | 72 050,0 | 16,3 | 60 298,0 | 83 802,0 |
| | N-F | | | | | |
| | N-N | 58 | 62 371,7 | 18,8 | 50 619,7 | 74 123,6 |
| | ND | | | | | |
| Ma | F-N | | | | | |
| | F-F | 42 | 43 530,3 | 13,3 | 37 757,0 | 49 303,5 |
| | N-F | | | | | |
| | N-N | 10 | 10 364,3 | 55,7 | 4 591,1 | 16 137,6 |
| | ND | | | | | |
| By | F-N | | | | | |
| | F-F | 91 | 157 020,8 | 7,7 | 144 884,5 | 169 157,0 |
| | N-F | 1 | 1 725,5 | 195,1 | -1 640,5 | 5 091,5 |
| | N-N | 13 | 22 431,5 | 50,9 | 11 009,8 | 33 853,3 |
| | ND | 1 | 1 725,5 | 195,1 | -1 640,5 | 5 091,5 |

Bhp = Bosques muy húmedos y pluviales; Bh = Bosques húmedos; Bs = Bosques secos; Ma = Manglar; By = Bosques de palma (Yolillal); B-N = Bosque a no-bosque; B-B = Bosque permanece bosque; N-B = No-bosque a bosque; N-N = No-bosque permanece no-bosque; ND = Sin información; F-N = deforestación; F-F = Bosque estable; N-F = Bosques nuevos; N-N no bosque estable= ; ND = Sin información.

En la estratificación por áreas protegidas se obtuvo que, dentro de las áreas protegidas no se presentó deforestación ni obtención de bosques nuevos, sino que estos cambios de uso se presentaron únicamente fuera de ellas (cuadro 20).

Cuadro 20. Áreas y límites de confianza para los cambios de uso de REDD+ dentro y fuera de áreas protegidas en Costa Rica para el periodo 2014-2015.

| Estrato | Cambio | n _i | A _i | E(%) | Li | Ls |
|-------------------|--------|----------------|----------------|------|-------------|-------------|
| Área no-protegida | F-N | 13 | 15 421,6 | 54,2 | 7 055,4 | 23 787,9 |
| | F-F | 1701 | 2 017 863,5 | 3,3 | 1 952 195,7 | 2 083 531,2 |
| | N-F | 11 | 13 049,1 | 59,0 | 5 350,8 | 20 747,4 |
| | N-N | 1471 | 174 5018,9 | 3,8 | 1 679 442,8 | 1 810 595,0 |
| | ND | 7 | 8 304,0 | 74,0 | 2 159,0 | 14 448,9 |
| Área protegida | F-N | 0 | | | | |
| | F-F | 569 | 1 133 070,8 | 3,1 | 1 098 500,3 | 1 167 641,3 |
| | N-F | 0 | | | | |
| | N-N | 87 | 173 246,3 | 19,6 | 139 325,5 | 207 167,1 |
| | ND | 4 | 7 965,3 | 97,7 | 183,0 | 15 747,7 |

F-N = Deforestación; F-F = Bosque estable; N-F = Bosques nuevos; N-N = No bosque estable; ND = Sin información.

Como se puede apreciar en el cuadro 20, se obtuvo aproximadamente 1 133 071 ha de bosque estable dentro de áreas protegidas en Costa Rica. Este dato, resulta inferior a lo indicado en el INF 2014-15 [31] donde se reporta un área de 1 265 692 ha. Sin embargo, la estimación del INF abarca el área comprendida por la categoría de pastos con árboles. Esta estratificación por áreas protegidas resulta importante debido a que se ha determinado que en Costa Rica los bosques en áreas protegidas almacenan cerca de la mitad del CO₂ capturado por especies vegetales mayores, y una tercera parte del CO₂ fijado en el suelo en bosques [31].

A continuación, en el cuadro 21, se muestran los resultados de áreas y límites de confianza específicamente para las actividades de REDD+ consideradas en este estudio.

Cuadro 21. Áreas y límites de confianza para las actividades REDD+ en Costa Rica en el periodo 2014-2015.

| Actividad REDD+ | n_i | A_i | E(%) | Li | Ls |
|------------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| DF | 11 | 14 562,1 | 59,0 | 5 968,7 | 23 155,5 |
| NL | 2 | 2 647,7 | 138,6 | -1 020,9 | 6 316,2 |
| AE.ff | 1103 | 1 460 180,0 | 5,0 | 1 387 340,5 | 1 533 019,5 |
| AE.nf | 8 | 10 590,6 | 69,2 | 3 259,3 | 17 921,9 |
| AE.pp | 139 | 184 011,8 | 16,3 | 153 976,2 | 214 047,4 |
| AE.np | 3 | 3 971,5 | 113,1 | -520,9 | 8 463,9 |
| CO | 1028 | 1 360 893,0 | 5,2 | 1 289 624,5 | 1 432 161,5 |
| EXL | 11 | 14 562,1 | 59,0 | 5 968,7 | 23 155,5 |
| NA | 1558 | 2 062 520,8 | 3,8 | 1 983 408,5 | 2 141 633,0 |

DF = deforestación; NL = pérdidas no antrópicas de bosque; AE.ff = aumento de existencias de carbono en bosques que siguen siendo bosques; AE.nf = aumento de existencias de carbono en tierras convertidas a bosques; AE.pp = aumento de existencias de carbono en plantaciones forestales que siguen siendo plantaciones forestales; AE.np = aumento de existencias de carbono en tierras convertidas a plantaciones forestales; CO = conservación de existencias de carbono; EXL = áreas sin información excluidas de la contabilidad; NA = áreas sin existencias de carbono.

En el cuadro 21, se observa que la mayoría de las deforestaciones ocurridas corresponden a deforestaciones de tipo antropogénico. Sin embargo, los errores son sumamente altos en las clases que implican un cambio de uso de la tierra (DF, NL, AE.nf, AE.np) de las cuales se obtuvieron pocas observaciones. Las demás actividades, por el contrario, presentaron errores muy bajos.

En el cuadro 22, se aprecia que se obtuvo un área de conservación de reservas de carbono en bosques maduros de 575 359,8 ha, y esta proviene principalmente de los bosques húmedos. Para pérdidas de bosque primario solo se obtuvo una observación que resultó en un área de 1 028,0 ha con un muy alto error (196 %) (cuadro 23). Para bosques secundarios por su parte, se obtuvo una pérdida total de reservas de carbono de 17 349,3 ha provenientes en su totalidad de bosques muy húmedos y pluviales y bosques húmedos, y en su mayoría tratándose de pérdidas de

carácter antropogénico (cuadro 24), mientras que en plantaciones forestales se obtuvo tan solo una observación de pérdidas de reservas de carbono resultando en un área de 2 034,9 ha y un error de 196 % (cuadro 25). En cuanto a las ganancias en bosques secundarios se obtuvo un área de 1 414 720,3 ha donde el 99% de esta área proviene de bosques que permanecen como bosques (cuadro 26), mientras que en el área de ganancia de reservas de carbono en plantaciones forestales fue de 157 984,79 ha donde el 97 % de esta área proviene de plantaciones forestales estables (cuadro 27).

Cuadro 22. Conservación de reservas de carbono en bosques maduros.

| Actividad REDD+ | Tipo de bosque | n _i | A _i (ha) | E(%) | Li | Ls |
|-----------------|----------------|----------------|---------------------|------|-------------|-------------|
| CO | Bhp | 531 | 1 080 529,1 | 6,0 | 1 015 882,5 | 1 145 175,7 |
| | Bh | 378 | 388 579,7 | 9,3 | 352 459,9 | 424 699,5 |
| | Bs | 22 | 23 658,2 | 37,9 | 14 684,1 | 32 632,3 |
| | Ma | 38 | 39 384,5 | 16,5 | 32 886,9 | 45 882,1 |
| | By | 58 | 100 079,2 | 17,3 | 82 747,0 | 117 411,4 |
| | Total | 1 027 | 1 632 230,7 | 8,2 | 1 498 660,5 | 1 765 801,0 |

Cuadro 23. Pérdidas de carbono en Bosques primarios

| Actividad REDD+ | Tipo de bosque | n _i | A _i | E(%) | Li | Ls |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------|--------|--------|
| DF | Bhp | 0 | | | | |
| | Bh | 1 | 1 028,0 | 196,0 | -986,5 | 3042,4 |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| | Total | 1 | 1 028,0 | 196,0 | -986,5 | 3042,4 |
| NL | Bhp | 0 | | | | |
| | Bh | 0 | | | | |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| | Total | 0 | | | | |

| | | | | | | |
|----|-------|---|---------|-------|--------|--------|
| | Bhp | 0 | | | | |
| | Bh | 1 | 1 028,0 | 196,0 | -986,5 | 3042,4 |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| TL | Total | 1 | 1 028,0 | | -986,5 | 3042,4 |

DF = deforestación; NL = pérdidas no antropogénicas de bosque; TL = pérdidas totales.

Cuadro 24. Pérdidas de carbono en Bosques secundarios

| Actividad REDD+ | Tipo de bosque | n _i | A _i (ha) | E(%) | Li | Ls |
|-----------------|----------------|----------------|---------------------|-------|---------|---------|
| | Bhp | 4 | 8 139,6 | 97,8 | 178,0 | 16101,2 |
| | Bh | 5 | 5 139,9 | 87,6 | 639,1 | 9640,8 |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| DF | Total | 9 | 13 279,5 | 93,8 | 817,0 | 25742,0 |
| | Bhp | 2 | 4 069,8 | 138,5 | -1565,3 | 9704,9 |
| | Bh | 0 | | | | |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| NL | Total | 2 | 4 069,8 | 138,5 | -1565,3 | 9704,9 |
| | Bhp | 6 | 12 209,4 | 111,4 | -1387,3 | 25806,0 |
| | Bh | 5 | 5 139,9 | 87,6 | 639,1 | 9640,8 |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| TL | Total | 11 | 17 349,3 | 104,3 | -748,2 | 35446,9 |

DF = deforestación; NL = pérdidas no antropogénicas de bosque; TL = pérdidas totales.

Cuadro 25. Pérdidas de carbono en plantaciones forestales.

| Actividad REDD+ | Tipo de bosque | n_i | A_i | E(%) | Li | Ls |
|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-------------|-----------|-----------|
| DF | Bhp | 1 | 2 034,9 | 195,9 | -1 951,6 | 6 021,4 |
| | Bh | 0 | | | | |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| | Total | 1 | 2 034,9 | 195,9 | -1 951,6 | 6 021,4 |
| NL | Bhp | 0 | | | | |
| | Bh | 0 | | | | |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| | Total | 0 | | | | |
| TL | Bhp | 1 | 2 034,9 | 195,9 | -1 951,6 | 6 021,4 |
| | Bh | 0 | | | | |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| | Total | 1 | 2 034,9 | 195,9 | -1 951,6 | 6 021,4 |

DF = deforestación; NL = pérdidas no antropogénicas de bosque; TL = pérdidas totales.

Cuadro 26. Ganancias de carbono en bosques secundarios

| Actividad REDD+ | Tipo de bosque | n_i | A_i (ha) | E(%) | Li | Ls |
|------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| AE.ff | Bhp | 244 | 496 514,3 | 11,0 | 441 922,4 | 551 106,2 |
| | Bh | 781 | 802 859,1 | 5,8 | 756 071,1 | 849 647,2 |
| | Bs | 40 | 43 014,9 | 25,6 | 32 022,3 | 54 007,5 |
| | Ma | 4 | 4 145,7 | 94,2 | 242,3 | 8 049,2 |
| | By | 33 | 56 941,6 | 28,3 | 40 818,9 | 73 064,3 |
| | Total | 1102 | 1 403 475,7 | 9,4 | 1 271 077,0 | 1 535 874,4 |
| AE.nf | Bhp | 3 | 6 104,7 | 113,0 | -793,5 | 13 002,9 |
| | Bh | 5 | 5 139,9 | 87,6 | 639,1 | 9 640,8 |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| | Total | 8 | 11 244,6 | 101,4 | -154,5 | 22 643,8 |
| TE | Bhp | 247 | 502 619,0 | 12,2 | 441 128,8 | 564 109,1 |
| | Bh | 786 | 807 999,1 | 6,3 | 756 710,1 | 859 288,1 |
| | Bs | 40 | 43 014,9 | 25,6 | 32 022,3 | 54 007,5 |
| | Ma | 4 | 4 145,7 | 94,2 | 242,3 | 8 049,2 |
| | By | 33 | 56 941,6 | 28,3 | 40 818,9 | 73 064,3 |
| | Total | 1110 | 1 414 720,3 | 10,2 | 1 270 922,5 | 1 558 518,2 |

AE.ff = aumento de existencias de carbono en bosques que siguen siendo bosques;

AE.nf = aumento de existencias de carbono en tierras convertidas a bosques; TE =

Aumento total.

Cuadro 27. Ganancias de carbono en plantaciones forestales.

| Actividad REDD+ | Tipo de bosque | n _i | A _i | E(%) | Li | Ls |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| AE.pp | Bhp | 10 | 20 348,9 | 61,7 | 7 796,7 | 32 901,2 |
| | Bh | 124 | 127 470,6 | 17,2 | 105 592,4 | 149 348,8 |
| | Bs | 5 | 5 376,9 | 85,9 | 759,1 | 9 994,7 |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 0 | | | | |
| | Total | | 139 | 153 196,4 | 25,5 | 114 148,1 |
| AE.np | Bhp | 1 | 2 034,9 | 195,9 | -1 951,6 | 6 021,4 |
| | Bh | 1 | 1 028,0 | 196,0 | -986,5 | 3 042,4 |
| | Bs | 0 | | | | |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 1 | 1 725,5 | 195,1 | -1 640,5 | 5 091,5 |
| | Total | | 3 | 4 788,4 | 195,6 | -4 578,6 |
| TE | Bhp | 11 | 22 383,8 | 73,9 | 5 845,1 | 38 922,6 |
| | Bh | 125 | 128 498,6 | 18,6 | 104 605,9 | 152 391,2 |
| | Bs | 5 | 5 376,9 | 85,9 | 759,1 | 9 994,7 |
| | Ma | 0 | | | | |
| | By | 1 | 1 725,5 | 195,1 | -1 640,5 | 5 091,5 |
| | Total | | 142 | 157 984,8 | 30,6 | 109 569,6 |

AE.pp = aumento de existencias de carbono en plantaciones forestales que siguen siendo plantaciones forestales; AE.np = aumento de existencias de carbono en tierras convertidas a plantaciones forestales; TE = aumento total de existencias de carbono.

El presente trabajo evidencia que es posible realizar estimaciones de cambio de uso desde un nivel general hasta estimaciones específicas de diferentes actividades REDD+ a partir de la herramienta Collect Earth. Además, también fue posible aplicar diferentes estratificaciones a partir de capas de información geográfica. De esta manera se demuestra, la capacidad del Collect Earth para la estimación de datos de actividad para el MRV del programa REDD+ de Costa Rica.

Sin embargo, en todas las estimaciones de áreas de pérdidas y ganancias de bosques a diferentes niveles realizadas, los errores asociados son sumamente elevados (mayores al 50 %). El FCPF sugiere que las incertidumbres se mantengan por debajo del 15 % [37], por lo que se deben buscar formas de reducir el error de las

estimaciones. Partiendo de los principios generales del muestreo, se sabe que un número mayor de parcelas produce errores más bajos de muestreo [38], y como se puede apreciar en los resultados, fueron muy escasas las observaciones que se obtuvieron para las clases de cambio que involucran tierras forestales convertidas a tierras no forestales, y tierras no forestales convertidas a tierras forestales. Este problema se amplía al estratificar por tipo de bosque y al hacer estimaciones más específicas por actividad REDD+. Casanoves et al. [39], sugiere que se debe buscar un punto de equilibrio entre la precisión y el costo que implica la toma de datos, al mismo tiempo que se satisfagan los requerimientos de los usuarios finales.

Hewson et al. [38], indica que es común realizar estratificaciones por tipo de bosque, dado que este enfoque aumenta el poder estadístico y brinda estimaciones más precisas de las reservas de carbono. Sin embargo, el autor indica que, si el objetivo del muestreo es cuantificar con precisión los cambios en las reservas de carbono forestal, los esfuerzos se deben enfocar a asignar parcelas en áreas que las reservas de carbono son susceptibles a disminuir (degradación o deforestación) o aumentar (reforestación o regeneración). Respecto a esto, el GFOI [5] menciona que se pueden utilizar datos auxiliares para detectar o pronosticar áreas de cambio en las cuales se puede implementar la intensificación del muestreo para mejorar las estimaciones de interés particular. Estos datos pueden ser: historiales de alteraciones, tenencia de la tierra, estadísticas de explotación de bosques, datos sobre incendios forestales, datos sobre el impacto de plagas, entre otros, que se tengan en formato espacial. Además, el GFOI [5] agrega que este puede ser un método eficiente en relación con los costos. En el presente estudio, por ejemplo, los resultados obtenidos al estratificar por área protegida sugieren que la información de áreas protegidas puede ser información de utilidad dado que la deforestación y ganancia de nuevos bosques ocurrieron fuera de ellas. Otro factor por considerar es que, como se mencionó anteriormente, en 2014 hubo 3 792 parcelas sin información, lo que redujo en una tercera parte el tamaño de la muestra.

4. Conclusiones

4.1 Consistencia de los datos de uso de la tierra de Collect Earth

La consistencia de los datos de EVM utilizando Collect Earth fue relativamente baja. El uso de matrices determinó que estos presentan una consistencia global de 73 y 69 % para los años 2013 y 2015 respectivamente. La resolución de las imágenes no fue un factor determinante para la consistencia dado que al utilizar únicamente imágenes de alta resolución la consistencia global no mejoró sustancialmente. La variación de la consistencia entre las agrupaciones de puntos por región fue de 13%, sin embargo, no se determinó ningún patrón que permita afirmar que la región de evaluación es responsable de la consistencia. Las discrepancias entre evaluaciones de uso de la tierra parecen obedecer más bien, a la experiencia, entrenamiento y habilidades visuales y analíticas de cada intérprete.

Distinguir entre categorías estrechamente relacionadas o con límites difusos entre sí, representó el mayor reto para los evaluadores a la hora de interpretar el uso de la tierra. Por ejemplo, en este estudio, tanto la prueba t para muestras de observaciones pareadas como el uso de matrices de error, apuntan a que la mayor fuente de inconsistencias fue la distinción entre tierras forestales, específicamente, la distinción entre bosque maduro y bosque secundario debido a la gran proporción de datos que pertenecen a estas categorías y la proporción de estos en que existen inconsistencias. Otras confusiones reiteradas entre clases de uso encontradas en este estudio fueron las confusiones entre: bosque secundario y pastos; yolillal y bosque maduro; plantación forestal y bosque secundario; cultivos anuales y cultivos permanentes; zona urbana continua y zona urbana discontinua; pastos y cultivos anuales.

4.2 Estimación de datos de actividad para el programa REDD+ Costa Rica

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que es posible utilizar datos de EVM obtenidos a través de Collect Earth para realizar estimaciones de uso y cambios de uso de la tierra a diferentes niveles de especificidad y aplicando diferentes estratificaciones para ajustar las estimaciones según los requerimientos del programa REDD+ Costa Rica.

Las estadísticas de uso de la tierra para Costa Rica indican que en 2014 había un 52,4 % de tierras forestales y aumentan a un 56,9 % al año 2015; cálculos que resultaron estadísticamente iguales a los obtenidos en el INF para el año 2012 utilizando mapas de clasificación de la tierra y para el año 2013 mediante observaciones de campo. Al llevar este cálculo a nivel de subcategoría para las tierras forestales se observó un aumento general en los bosques, pero disminución en manglares y plantaciones forestales, tendencia que se ha manifestada en otros estudios. En cuanto a los usos no forestales el de mayor presencia fueron los pastos con 29,8 y 27,3 % para 2014 y 2015 respectivamente seguido de cultivos anuales y cultivos agrícolas. Los errores en la estimación de estadísticas de uso mostraron una relación directa con el porcentaje de uso, de manera que entre más se presentó un uso menor fue su error.

En cuanto a las áreas de cambio de uso de la tierra, se obtuvo que la resolución de las imágenes utilizadas, el desplazamiento entre las imágenes utilizadas y el rango de las fechas utilizadas tienen un efecto considerable en las estimaciones. Al utilizar únicamente imágenes de alta resolución, desaparecen casi todas las observaciones de la clase “sin información”, por lo que aumenta la proporción y el área de las demás clases excepto la de bosques nuevos que se reduce en 13 404 ha con respecto a utilizar todos los datos. Al eliminar los datos con desplazamiento entre imágenes, la deforestación disminuye en 7 887 ha sin embargo el área de bosques nuevos también disminuye 7 454 ha; y por último al disminuir el periodo de evaluación de enero 2012 a junio 2014 para el año 2014 y de julio 2014 a diciembre

2016 para 2015, nuevamente disminuye tanto el área de deforestación, en 8 228 ha, como el área de bosques nuevos en 6 805 ha.

El área de deforestación en Costa Rica para el periodo 2014.2015, estimada bajo el escenario ideal de datos (escenario 4), es de 17 210 ha las cuales aumentan a 20 412 ha al estratificar por tipos de bosque sin embargo representa una disminución sustancial con respecto a la deforestación reportada en el NREF emitido por Costa Rica para el periodo 2012-2013 (34 705 ha). Esta diferencia probablemente es producto de la diferencia en las metodologías de estimación.

Las estimaciones de cambios de uso según las categorías generales de cambio de uso para REDD+, presentaron errores menores a 4 % para las categorías de bosque estable y no bosque estable, mientras que para las categorías de bosques nuevos y deforestación los errores fueron mayores al 50%. Estos errores se aumentaron al estratificar por tipo de bosque y al hacer estimaciones por actividad REDD+ llegando a presentar errores en este ultimo caso de hasta 196 % para las clases específicas de deforestación en bosques primarios en el estrato de bosques húmedos y deforestación de plantaciones forestales en el estrato de bosques muy húmedos y pluviales. Esto debido a que la cantidad de observaciones para estas actividades tan específicas resultan muy escasas, y para corregir esto es necesario establecer un diseño de muestreo en función de la detección de estas áreas de interés.

La estratificación según las áreas protegidas indicó que, en Costa Rica, dentro de las áreas protegidas, no ocurrió deforestación ni ganancia de bosques nuevos entre 2014 y 2015, sino que estas áreas se encontraron fuera de áreas protegidas y hubo un área de 1 133 071 ha de bosque estable dentro de áreas protegidas y 2 017 864 ha en áreas no protegidas.

5. Recomendaciones

Dado que los resultados obtenidos apuntan a que la interpretación del uso de la tierra mediante EVM de imágenes satelitales depende del “marco perceptual del intérprete”⁸, a la hora de realizar estudios de uso de la tierra en Costa Rica mediante EVM con la herramienta Collect Earth, se debe implementar un oportuno sistema de control y aseguramiento de la calidad (QA/QC) para aumentar la consistencia de los datos en comparación con la obtenida este estudio. Este sistema deberá incorporar la capacitación y calibración⁹ de los evaluadores haciendo énfasis en las clases que se determinaron en este estudio que generan mayores confusiones entre sí, las cuales fueron: bosque secundario y bosque maduro; bosque secundario y pastos; yolillal y bosque maduro; plantación forestal y bosque secundario; cultivos anuales y cultivos permanentes; zona urbana continua y zona urbana discontinua; pastos y cultivos anuales. Adicionalmente, se debe incluir un protocolo de etiquetado con reglas de decisión para la distinción entre estas clases. Como parte del QA/QC se recomienda incluir también la realización de “*hot checks*”, “*cold checks*” y “*blind checks*” a lo largo del proceso para identificar y corregir errores en la medida de lo posible.

Las observaciones obtenidas en este estudio para las clases de cambio bosques nuevos y deforestación, así como para las actividades REDD+, y sus posteriores estratificaciones, fueron muy escasas. Esto resultó en errores asociados a estas estimaciones que oscilaron entre 50 y 196 %. Para reducir este error, se debe procurar establecer una mayor cantidad de observaciones en estas áreas de interés. Para esto, se recomienda Incorporar el uso de datos como historiales de alteraciones, tenencia de la tierra, estadísticas de explotación de bosques, datos sobre incendios forestales, datos sobre el impacto de plagas, entre otros, que se tengan en formato espacial para determinar áreas de posible pérdida o ganancia de

⁸ ‘Marco perceptual del intérprete’: combinación de la capacitación, experiencia, el sesgo y las habilidades visuales y analíticas del intérprete [29].

⁹ Calibración de evaluadores: uniformar las interpretaciones del uso de la tierra de los evaluadores, aumentando la consistencia de los datos.

reservas forestales de carbono, que permita ajustar el diseño de muestreo, intensificando la muestra en estas áreas. El uso de datos espaciales sobre la ubicación de áreas silvestres protegidas puede considerarse como una buena opción dado que los resultados de este estudio indican que dentro de ellas el uso de la tierra es estable (bosque estable y no bosque estable).

6. Bibliografía

- [1] Secretaría REDD+ Costa Rica, “Plan de implementación de la Estrategia Nacional REDD+ Costa Rica”, San José, Costa Rica, 2017
- [2] M. J. Mlotha, "Analysis of Land Use/Land Cover Change Impacts Upon Ecosystem Services in Montane Tropical Forest of Rwanda: Forest Carbon Assessment and REDD+ Preparedness", Tesis, Antioch University, New England, 2018.
- [3] M. Köhl, C. Scott, A. Lister, I. Demon, D. Plugge, “Avoiding treatment bias of REDD+ monitoring by sampling with partial replacement”, *Carbon balance and management*, vol. 10, No. 1, p. 11. DOI 10.1186/s13021-015-0020-y.
- [4] V. De Sy et al., “Synergies of multiple remote sensing data sources for REDD+ monitoring”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 4, núm. 6, pp. 696–706, dic. 2012.
- [5] GFOI, “Integración de las observaciones por teledetección y terrestres para estimar las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en los bosques: Métodos y Orientación de la Iniciativa Mundial de Observación de los Bosques” Edición 2.0, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma. 2016
- [6] S. Joseph, M. Herold, W. D. Sunderlin, y L. V. Verchot, “REDD+ readiness: early insights on monitoring, reporting and verification systems of project developers”, *Environmental Research Letters*, vol. 8, núm. 3, p. 34038, sep. 2013.
- [7] J. Fernandez, “Medición, reporte y verificación de REDD+: documentp metodológico”. Secretaria REDD+ Costa Rica, 2013.
- [8] IPCC, “GoodPractice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry”, Institute for Global Environmental Strategies, 2003.
- [9] IPCC, “Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Vol 4, Agriculture, Forestry and other Land Use. Institute for Global Environmental, 2006.
- [10] R. McRoberts, S.V. Stehman, G.C. Liknes, E. Naesset, C. Sannier & B.F. Walters, “The effects of imperfect reference data on remote sensing-assisted estimators of land cover class proportions”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Julio, 2018.

- [11] Secretaría REDD+ Costa Rica, “Documento del paquete de la preparación para REDD+”, San José, Costa Rica. 2015.
- [12] R. E. McRoberts, “Satellite image-based maps: Scientific inference or pretty pictures?”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, núm. 2, pp. 715–724, 2011.
- [13] F.J. Gallego, “Remote sensing and land cover area estimation”, *International Journal of Remote Sensing*, junio, 2004.
- [14] P. Olofsson, G.M. Foody, S. V. Stehman & C.E Woodcock, “Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation”, *Remote Sensing of Environment*, noviembre, 2013.
- [15] C. Sannier, R.E. McRoberts & L.V. Fichet. “Suitability of Global Forest Change data to report forest cover estimates at national level in Gabon”, *Remote Sensing of Environment*, noviembre, 2016.
- [16] GFOI, “Summary of Country experiences and critical issues related to estimation of activity data” 2018.
- [17] P. Olofsson, et al., “Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change”. *Remote Sensing of Environment*. 148, 42-57. 2014.
- [18] FAO, “Collect Earth User Manual: A guide to monitoring land use change and deforestation with free and open source software.”
- [19] A. Bey, et al., “Collect Earth: Land Use and Land Cover Assessment through Augmented Visual Interpretation. *Remote Sensing*” 8(10): p 807-830 . 2016
- [20] UNESCO. (2007). *Balance hídrico superficial de Costa Rica. Período: 1970-2002*. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°1. Recuperado de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001563/156338s.pdf>
- [21] MINAE. “Forest reference emission level/forest reference level Costa Rica: Submission to the UNFCCC secretariat for technical review according to decision 13/CP.19.” 2016

- [22] Quesada, R. (2007). Los Bosques de Costa Rica. Centro de investigación integración. Recuperado de:
<http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>
- [23] FAO. “FRA 2000: Bibliografía comentada en Cambios en la cobertura forestal en Costa Rica.” Roma: FAO. 2000.
- [24] A. Tapia, E. Ortiz, “Protocolo para el etiquetado de referencia: cambios de uso de la tierra”, 2017.
- [25] E. Ortiz, “Cartografía base para realizar el Inventario Nacional Forestal (INF) de Costa Rica 2013-2014”. REDD/CCAD/GIZ. SINAC-FONAFIFO. San José, Costa Rica. 2014.
- [26] Ministerio de Ambiente y Energía Costa Rica (MINAEC) Sistema Nacional de Áreas de Conservación. 2015. Marco Metodológico para la Fase I (Pre-Muestro) y la Fase II (Muestreo). Inventario Forestal Nacional. Volumen 4/SINAC, Programa REDD/CCDA-GIZ, FONAFIFO. Compilado por Ing. Jorge Fallas Gamboa. San José, Costa Rica: Programa REDD/CCDA-GIZ.
- [27] E. Ortiz, “Atlas digital de Costa Rica”, Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR, 2014.
- [28] K. Straume, “Variation in land cover classification due to individual interpreter assessment: a case study of farmland mapping in Norway”, *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, vol. 115, núm. 2, pp. 167–184, jul. 2015.
- [29] W.R. Philipson, “Manual of photographic interpretation”, Bethesda, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997.
- [30] R. . Powell et al., “Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 90, núm. 2, pp. 221–234, 2004.
- [31] R. Lunetta, et al., “An Assessment of Reference Data Variability Using a "Virtual Field Reference Database"”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 67. 2000

- [32] D. Diaz, M. Delaney, "Carbon Stock Assessment Guidance: Inventory and Monitoring Procedures", En Building Forest Carbon Projects, J. Ebeling, j. Olander (eds.). Washington, DC: Forest Trends, 2011.
- [33] T.R.H. Pearson, S.L Brown & R.A. Bridey, Measurement Guidelines for the Sequestration of Forest Carbon, Delaware, OH: USDA, 2007.
- [34] P. Emanuelli, et al., "Inventario Nacional Forestal de Costa Rica 2014-2015. Resultados y Caracterización de los Recursos Forestales", Programa Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal en Centroamérica y la República Dominicana (REDD/CCAD/GIZ) y Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) Costa Rica. San José, Costa Rica. 380 p. 2015.
- [36] A. I. Barquero, G. Hernández, "Bosques y Pago de Servicios Ambientales en Costa Rica." *Ambientico*. n°253, 6-11. 2015.
- [36] FAO. "El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra". Roma. 2017
- [37] FCPF, "Marco metodológico del Fondo de Carbono del FCPF" Washington, D.C., The World Bank. 39 p, 2013.
- [38] Hewson, J., M.K. Steininger y S. Pesmajoglou, A. Parra y D. Shoch. 2014. Manual de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de REDD+ Versión 2.0: Resumen.
- [39] F. Casanoves, M. Cifuentes, M. Chachón. "Estimación del carbono a partir de inventarios forestales nacionales: Buenas prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos" 1ra ed, CATIE: Turrialba, 2017.

Anexos

Anexo 1. Categorías de uso de la tierra consideradas en el estudio.

| Categoría | Subcategoría | Definición operativa |
|---------------------|---------------------|---|
| Vegetación Forestal | Bosque maduro | Bosques que tienen al menos una hectárea, (la hectárea puede o no estar dentro de la parcela) con dos o más estratos de árboles, presentan una distribución irregular. El análisis multitemporal debe mostrar que estos tienen al menos 23 años. |
| | Bosque secundario | Se distingue un estrato superior continuo de árboles de similar altura. Los árboles presentan una distribución espacial irregular. Se diferencia de las plantaciones forestales en que éste cuenta con más especies, y por lo tanto las formas de las copas son diferentes y no uniformes. Debe tener al menos una hectárea para que sea considerado bosque secundario. El análisis multi-temporal debe mostrar que estos no tienen más de 23 años |
| | Rodales de mangle | Se encuentran cerca del mar, son siempre-verdes por lo que presentan valores de NDVI altos durante todo el año, son relativamente homogéneos. En Costa Rica se encuentran principalmente en el litoral Pacífico, y algunos lugares del Caribe como Puerto Viejo, y Gandoca. |
| | Yolillales | Se distingue la presencia de la palma conocida como yolillo, se presenta en áreas anegadas y en zonas bajas, nunca en pendiente. Se diferencian de una plantación de palma africana, por ejemplo, porque los yolillales tienen una distribución natural, al azar. A distancia parece un sembradío, pero al hacer un zoom no se observa un arreglo lineal. Sin una imagen de AR es muy difícil diferenciarlo. En Costa Rica se encuentran principalmente en el Caribe. |
| | Plantación forestal | Se observa un estrato y una distribución regular. En ocasiones se puede distinguir bien las hileras de plantación, sobre todo si la imagen muestra la plantación unos cuantos meses después del establecimiento. Si la imagen de AR parece ser una plantación forestal, debe siempre hacer un análisis de gráfico NDVI e imágenes landsat para estar seguro. |
| Agricultura | Cultivos anuales | Se distingue la siembra de un cultivo por la |

| | | |
|---------------|--|---|
| | | vegetación homogénea, muchas veces se puede observar la presencia de vías de transporte entre los sembradíos, si el cultivo es anual en el gráfico NDVI se podrá observar los cambios que suceden en la cosecha y preparación del terreno en lapsos regulares. Ejemplos de cultivos anuales: piña, caña, hortalizas, arroz, melón, sandía, raíces y tubérculos. |
| | Cultivos permanentes | Comprende las áreas cultivadas que están dedicadas a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a dos años, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a sembrar. |
| | Áreas agrícolas heterogéneas | Comprende las áreas cultivadas donde se combinan diferentes cultivos agrícolas en extensiones pequeñas y con diferentes arreglos espaciales |
| | Cultivos confinados | Comprenden las tierras ocupadas por cultivos bajo infraestructura que cubre el área con materiales transparentes o no, por ejemplo, plástico o sarán. |
| Pastos | Pastos | Pueden ser naturales o sembrados. Se distinguen porque es vegetación corta, uniforme, cercada o delimitada por aparto (en el caso de aquellos sembrados). |
| Zonas húmedas | Aguas continentales: Embalses | Esta cobertura comprende los cuerpos de agua de carácter artificial para almacenar agua, usualmente con el propósito de generación de electricidad y abastecimiento de acueductos, también para prestar otros servicios como control de caudales, inundaciones, abastecimientos de agua, riego y con fines turísticos y recreativos. |
| | Aguas continentales: Ríos | Son las corrientes naturales de agua, permanente o intermitente, poseen caudal variable, permanente o estacional. |
| | Aguas continentales: Canales | Cauce artificial abierto que distribuye agua en movimiento. |
| | Aguas continentales: Estanques para acuicultura | Cuerpos de agua artificial destinados a la cría de crustáceos, moluscos, peces, anfibios y reptiles. Se pueden ubicar tierra adentro. Tienen una distribución artificial. |
| | Aguas continentales: Lagunas | Superficies o depósitos de agua naturales de carácter abierto o cerrado, que pueden estar conectadas o no o a un río o al mar. |

| | | |
|-----------------|-------------------------------------|---|
| | Aguas marítimas: océanos y mares | Comprende los cuerpos de agua salada |
| | Aguas marítimas: Esteros | Comprende la parte terminal de la desembocadura de los ríos, que están expuestos a la influencia de las aguas marinas. Son espacios resultantes de la dinámica de las mareas que producen el ensanchamiento de las desembocaduras. |
| | Aguas marítimas: Lagunas costeras | Superficies de agua salada o salobre, separadas del mar por tierras sobresalientes u otras topografías similares. Pueden tener comunicación con el mar de manera permanente o temporal a través de canales, barras de arena y zonas de pantanos costeros. |
| Infraestructura | Zona urbana continua | Es un área densamente construida con edificaciones residenciales y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Se aprecia una trama o tejido estructural que permite distinguir la formación de cuadras residenciales. Por lo general en ciudades y centros poblados importantes. |
| | Zona urbana discontinua | Son espacios conformados por agrupaciones de edificaciones residenciales sin la formación de cuadrantes. Por lo general en centros poblados de áreas rurales. |
| | Zona industrial o comercial | Comprende las áreas cubiertas por infraestructura de uso exclusivamente comercial, industrial, de servicios y vías de comunicación asociadas. Por lo general las encontrará en lugares específicos cerca del centro de ciudades o poblados importantes y reconocidos. |
| | Vías de transporte: Red vial | Comprende las áreas de la superficie terrestre acondicionadas para la circulación principalmente vehículos que transportan personas y bienes. |
| | Vías de transporte: Red ferroviaria | Comprende las áreas de la superficie terrestre acondicionadas para la circulación de trenes que transportan personas y bienes. No es fácil distinguirlas, el conocimiento previo de la ubicación de éstas ayuda a localizarlas. |
| | Vías de transporte: zona portuaria | Instalaciones debidamente acondicionadas para el atracado de barcos y otros tipos de embarcaciones acuáticas. |
| | Vías de | Instalaciones equipadas para el aterrizaje y |

| | | |
|---------------|--|---|
| | transporte: Aeropuertos y zonas de aterrizaje | despegue de aviones y otros tipos de aeronaves. |
| | Zonas de extracción minera | Son áreas dedicadas a la extracción de materiales y minerales a cielo abierto. |
| | Escombreras y vertederas | Son espacios en lo que se depositan restos de construcción, residuos urbanos, desechos industriales y material estéril de minas. Se observa tierra desnuda y zonas donde se ubica la basura. |
| | Salinas | Son los territorios planos costeros donde se presentan depósitos de minerales evaporíticos mediante la construcción de lagunas de evaporación para su explotación. |
| | Zonas recreativas: Zonas verdes urbanas | Constituyen parques, que se ubican en centros poblados destinados para la recreación de sus habitantes. |
| | Zonas recreativas: Instalaciones recreativas | Constituyen canchas de futbol, canchas de golf, piscinas. |
| Otras tierras | Playa y arenales | Terrenos bajos y planos constituidos por suelos arenosos y pedregosos, generalmente desprovistos de vegetación o cubiertos por una vegetación de matorral ralo y bajo. Se trata principalmente de las playas litorales. |
| | Playón | Terrenos bajos y planos constituidos por suelos arenosos y pedregosos, generalmente desprovistos de vegetación. Se trata de las playas de ríos o bancos de arena de los ríos. |
| | Otro terreno descubierto / roca | Son terrenos sin cobertura vegetal, no urbana. Se presenta el afloramiento de roca o un tipo de vegetación herbácea y arbustiva pobremente desarrollada. Comprende área de cráteres volcánicos, deslizamientos y áreas de deposición de materiales por ríos y volcanes. |
| | Páramo | Comunidades vegetales de baja altura, generalmente localizadas en zonas de alta montaña, por encima de los 3.000 metros sobre el nivel del mar. |

Anexo 2. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de las subcategorías de tierras no forestales en Costa Rica para el año 2013.

| Categoría de uso* | X ₁ | X ₂ | d _f | S _d | t _c | Valor p |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
| Cultivos anuales | 6,81 | 4,29 | 2,52 | 17,64 | 4,55 | <0,001 |
| Cultivos permanentes | 3,60 | 5,25 | 1,65 | 13,02 | 4,03 | <0,001 |
| Áreas agrícolas heterogéneas | 0,98 | 0,00 | 0,98 | 9,20 | 3,39 | 0,001 |
| Cultivos confinados | 0,00 | 0,09 | 0,09 | 2,77 | 1,09 | 0,278 |
| Pastos | 25,98 | 27,59 | 1,61 | 27,59 | 1,86 | 0,063 |
| Embalse | 0,10 | 0,00 | 0,10 | 3,14 | 1,00 | 0,318 |
| Río | 0,30 | 0,34 | 0,05 | 2,43 | 0,62 | 0,535 |
| Canal | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 3,23 | 0,52 | 0,601 |
| Estanque de acuicultura | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,31 | 1,00 | 0,318 |
| Laguna | 0,43 | 0,68 | 0,25 | 8,08 | 0,98 | 0,328 |
| Estero | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,23 | 1,39 | 0,166 |
| Laguna costera | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,69 | 1,00 | 0,318 |
| Zona urbana continua | 0,69 | 0,68 | 0,02 | 6,53 | 0,08 | 0,939 |
| Zona urbana discontinua | 1,44 | 0,45 | 0,99 | 8,81 | 3,58 | <0,001 |
| Red vial | 0,58 | 0,46 | 0,12 | 2,07 | 1,88 | 0,061 |
| Aeropuertos | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,38 | 1,00 | 0,318 |
| Zonas verdes urbanas | 0,09 | 0,06 | 0,03 | 2,65 | 0,40 | 0,688 |
| Instalaciones recreativas | 0,02 | 0,10 | 0,08 | 2,98 | 0,84 | 0,400 |
| Playas | 0,13 | 0,03 | 0,10 | 3,14 | 1,02 | 0,308 |
| Playón | 0,23 | 0,17 | 0,05 | 1,00 | 1,69 | 0,091 |
| Otro terreno descubierto | 0,85 | 0,30 | 0,55 | 7,61 | 2,32 | 0,021 |
| Páramo | 0,30 | 0,13 | 0,17 | 4,52 | 1,19 | 0,233 |
| Sombras | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 1,07 | 1,00 | 0,318 |
| Nubes | 0,40 | 0,00 | 0,40 | 6,27 | 2,04 | 0,041 |
| Sin información | 0,40 | 0,00 | 0,40 | 6,27 | 2,04 | 0,041 |

Anexo 3. Resultados de la prueba t student para la diferencia de medias de los porcentajes de las subcategorías de tierras no forestales en Costa Rica para el año 2015.

| Categoría de uso* | X ₁ | X ₂ | d _f | S _d | t _c | Valor p |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
| Cultivos anuales | 4,53 | 4,33 | 0,20 | 13,28 | 0,47 | 0,635 |
| Cultivos permanentes | 5,73 | 5,27 | 0,45 | 11,77 | 1,23 | 0,218 |
| Áreas agrícolas heterogéneas | 0,09 | 0,00 | 0,09 | 2,28 | 1,24 | 0,215 |
| Cultivos confinados | 0,10 | 0,09 | 0,01 | 1,11 | 0,28 | 0,778 |
| Pastos | 26,99 | 26,96 | 0,03 | 23,64 | 0,04 | 0,971 |
| Embalse | 0,16 | 0,00 | 0,16 | 3,46 | 1,49 | 0,137 |
| Río | 0,32 | 0,30 | 0,02 | 2,08 | 0,30 | 0,763 |
| Canal | 0,01 | 0,11 | 0,09 | 3,17 | 0,95 | 0,342 |
| Estanque de acuicultura | 0,01 | 0,01 | 0,00 | | | |
| Laguna | 0,07 | 0,70 | 0,63 | 8,15 | 2,48 | 0,013 |
| Estero | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,85 | 1,04 | 0,300 |
| Laguna costera | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,69 | 1,00 | 0,318 |
| Zona urbana continua | 0,36 | 0,76 | 0,41 | 5,26 | 2,46 | 0,014 |
| Zona urbana discontinua | 0,61 | 0,55 | 0,06 | 5,45 | 0,37 | 0,713 |
| Zona industrial comercial | 0,11 | 0,00 | 0,11 | 2,44 | 1,39 | 0,165 |
| Red vial | 0,73 | 0,56 | 0,17 | 2,10 | 2,57 | 0,010 |
| Aeropuertos | 0,00 | 0,05 | 0,05 | 1,44 | 1,00 | 0,318 |
| Zonas verdes urbanas | 0,01 | 0,06 | 0,05 | 1,04 | 1,45 | 0,147 |
| Instalaciones recreativas | 0,13 | 0,10 | 0,03 | 0,84 | 1,20 | 0,231 |
| Playas | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,06 | 1,00 | 0,318 |
| Playón | 0,17 | 0,19 | 0,02 | 0,83 | 0,68 | 0,497 |
| Otro terreno descubierto | 0,70 | 0,34 | 0,36 | 6,53 | 1,76 | 0,079 |
| Páramo | 0,23 | 0,13 | 0,10 | 3,14 | 1,02 | 0,308 |
| Sombras | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 1,65 | 1,33 | 0,184 |
| Nubes | 0,38 | 0,00 | 0,38 | 4,34 | 2,77 | 0,006 |