



Análisis del uso de la tierra en las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia, la región de la Orinoquía, desde 1999 hasta 2022

Jerónimo Vargas Serna

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesores

Santiago Valencia Cárdenas, Ingeniero Ambiental

Juan Camilo Villegas Palacio, Doctor (PhD) en Recursos Naturales

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2022



Cita

(Vargas-Serna et al., 2022)

Referencia

Vargas-Serna, J., Valencia, S., & Villegas, J. C. (2022). *Análisis del uso de la tierra en las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia, la región de la Orinoquía, desde 1999 hasta 2022* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Este trabajo fue realizado con el apoyo del grupo de investigación en Ecología Aplicada.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi abuela Rosa, quien es un ejemplo de aguante y fuerza en todo el sentido de la palabra.

Agradecimientos

Mis sinceros agradecimientos a Juan Camilo Villegas y a Santiago Valencia, quienes me han guiado por un camino que me ha dado muchísima satisfacción profesional, y que espero siga siendo así. A Luisa Fernanda Torres, quien me brindó ayuda incondicional en muchas ocasiones durante toda mi carrera académica y a quien considero una buena amiga. Al grupo de investigación en Ecología Aplicada de la Universidad de Antioquia. A NASA, por permitir utilizar sus imágenes libremente y contribuir a la generación de nuevo conocimiento científico.

Tabla de contenido

Resumen	8
1. Introducción	9
2 Objetivos	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3 Marco teórico	12
4 Metodología	15
5 Resultados	18
6 Análisis.....	25
7 Conclusiones	27
Referencias	28
Anexos.....	31

Lista de tablas

Tabla 1. Matriz de cambio de uso del suelo. Adaptado de Pontius et al., (2004).	14
Tabla 2. Porcentaje de píxeles que componen cada imagen de la clasificación final y su respectivo coeficiente Kappa.	18
Tabla 3. Intercambio de cada uso del suelo a través de los años.	24
Tabla 4. Cambio total de cada uso del suelo para los periodos analizados.	24

Lista de figuras

Fig. 1. Localización general de las sabanas de La Orinoquia, Colombia.	15
Fig. 2. Esquema de la metodología empleada.	16
Fig. 3. Porcentaje del área total de cada uso del suelo por periodo analizado.	19
Fig. 4. Clasificación final de cada periodo analizado. A) 2002. B) 2006. C) 2010. D) 2014. E) 2018. F) 2022.	20
Fig. 5. Persistencia, ganancia bruta y pérdida bruta de cada uso del suelo en todos los periodos analizados. Este concepto está basado en la extensión total del área de estudio, no es con base en el 100 % de un uso del suelo específico.	21
Fig. 6. Cambio neto para cada uso del suelo en cada periodo compuesto.	23

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
DNP	Departamento Nacional de Planeación
EVI	Índice de vegetación mejorada
Fedepalma	Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite
Fig	Figura
GEDI	Global Ecosystem Dynamics Investigation
Ha	Hectáreas
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
IIAV	Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
Km²	Kilómetros cuadrados
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Índice de vegetación normalizada
NDWI	Índice diferencial de agua normalizado
PIB	Producto Interno Bruto
UdeA	Universidad de Antioquia
USGS	United States Geological Survey

Resumen

Las sabanas tienen importantes servicios ecosistémicos como la formación del suelo y el mantenimiento de la biodiversidad. En este estudio se presenta un análisis de los cambios que se han dado en los usos del suelo de Los Llanos Orientales colombianos desde 1999 hasta 2022. Se utilizaron imágenes de Landsat tomando como base la temporada húmeda, fueron procesadas y clasificadas con Random Forest para los diferentes periodos, y se crearon matrices de cambio de uso del suelo para analizar las dinámicas que se dan. Los resultados muestran que las sabanas son el uso del suelo dominante (> 50 %). Se encontró que periodo a periodo, aproximadamente 7 de cada 10 hectáreas de cultivos y pastos se transformaron en otras categorías La palma de aceite se expandió principalmente en límites de Meta y Casanare. Se discute sobre la dirección de los cambios que se presentan y las oportunidades de mejora para trabajos posteriores.

Palabras clave: Sabanas, Llanos Orientales, Landsat, Palma de aceite, usos del suelo, 1999, 2022.

1. Introducción

La región de la Orinoquía colombiana, dominada por sabanas inundables y estacionales, alberga casi la mitad de los humedales de Colombia, el 40 % de aguas subterráneas y una exuberante biodiversidad de fauna y flora (Romero-Ruíz et al., 2012). Las sabanas inundables son un ecosistema de importancia económica, biológica y ecológica (Mora-Fernández et al., 2015) porque proveen servicios ecosistémicos como el reciclaje de nutrientes, formación del suelo y mantenimiento de biodiversidad (Cabrera-Amaya et al., 2020). Las sabanas estacionales retienen abundante agua durante la época de lluvias y presenta déficit durante la época seca (IIAV, 1997). En las últimas décadas la presión antropogénica en la zona ha crecido, y a futuro se prevé que la región continúe transformándose en una región ganadera, agrícola y petrolera. El Departamento Nacional de Planeación (DNP), en el CONPES 3797 de 2014, estableció para el 2024 la meta de tener 780.000 ha destinadas en usos agrarios como palma de aceite, arroz, maíz, ganadería, entre otros, y aumentar en 0,4 % el PIB colombiano. En Los Llanos hay antecedentes donde analizan cambios en el uso del suelo. Romero-Ruiz et al., (2012), analizaron las transformaciones del paisaje en esta región entre 1987 y 2007, encontrando/identificando una transición sistemática de sabanas inundadas a cultivos y pastos exóticos, incluyendo palma de aceite. Entre estos años, el 14 % del área estudiada presentó algún tipo de cambio de uso del suelo, y la mayor parte de los cambios ocurrieron entre 2000 y 2007. En particular, las plantaciones de palma de aceite pasaron de ocupar 31 km² en 1987 a 162 km² en 2007. Por esto, identificar los cambios históricos y analizar las dinámicas que se puedan dar en el uso del suelo es clave para tomar decisiones que permitan un desarrollo económico, social y ambiental en la región.

La teledetección es una herramienta que cada vez se torna más relevante para analizar los cambios en el uso del suelo. La teledetección proporciona información sobre objetos en o cerca de la superficie terrestre o la atmósfera basada en la radiación emitida por dichos objetos, estos datos permiten determinar la composición y naturaleza de la superficie a escala local y global, y evaluar cambios al comparar diferentes instantes de tiempo (Read & Torrado, 2009). Por ejemplo, las misiones Landsat han sido ampliamente utilizadas para analizar los cambios en la superficie terrestre causados por las actividades humanas (Acker et al., 2014) o por dinámicas naturales del entorno. Las imágenes Landsat se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones, muchas relacionadas tanto con la transformación biofísica del entorno (Townshend, 2001) como en las

sabanas del Cerrado (Conciani et al., 2021; Giles et al., 2021; Soto Vega et al., 2021) y las de la Orinoquía colombiana (Romero-Ruíz et al., 2012; González-Alonso et al., 2013).

En este trabajo, se analizaron las dinámicas en el uso de la tierra en la Orinoquia colombiana desde 1999 hasta 2022, con 6 periodos de análisis, que corresponden con los periodos gubernamentales en Colombia entre 2002 y 2022. En particular, se agruparon los usos del suelo en 7 categorías (cultivos y pastos, bosques, palma de aceite, cuerpos de agua, infraestructura, sabanas, y afloramientos rocosos). Para esto se emplearon imágenes satelitales de las misiones Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8, con una resolución espacial de 30 m y procesadas en Google Earth Engine.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar las dinámicas de uso de la tierra en las sabanas de la Orinoquía colombiana desde 1999 hasta 2022.

2.2 Objetivos específicos

- Describir los diferentes tipos de cambios en los usos de la tierra en las sabanas de la Orinoquía desde 1999 hasta 2022.
- Caracterizar los tipos de cambios en los usos de la tierra en las sabanas de la Orinoquía desde 1999 hasta 2022.
- Reclasificar imágenes Landsat de las sabanas de la Orinoquía desde 1999 hasta 2022 empleando Google Earth Engine.

3 Marco teórico

Las sabanas de la Orinoquía colombiana cubren un área de 380600 km² (CONPES 3794, 2014) y está dominada por sabanas inundables y sabanas estacionales (IDEAM, 2017). Las sabanas inundables son un ecosistema estratégico por su importancia económica, biológica y ecológica (Mora-Fernández et al., 2015); proveen servicios ecosistémicos como el reciclaje de nutrientes, formación del suelo, mantenimiento de biodiversidad, regulación hídrica y productividad primaria (Cabrera-Amaya et al., 2020). Las sabanas estacionales (la mayoría de sabanas colombianas al sur del río Meta) retienen abundante agua durante la época de lluvias y presenta déficit durante la época seca (IIAV, 1997).

La región de la Orinoquía colombiana tiene gran importancia ecológica debido a que alberga aproximadamente el 48 % de los humedales del país (IIAV, 2015), el 40 % de las reservas de agua subterránea (IDEAM, 2010), el 16 % de las plantas florales, el 8 % de musgos, el 8 % de líquenes, el 17 % de helechos, el 41 % de aves, el 40 % de mamíferos, el 24 % de reptiles y el 10 % de anfibios (Rangel-Ch, 2015). A pesar de esta exuberante diversidad y riqueza hídrica, es bajo el porcentaje de la región de la Orinoquía que está declarada como área protegida.

En las últimas décadas, la población humana asentada en la región de la Orinoquía ha aumentado. Desde los años 1980's también aumentó el área destinada a tierras agrícolas, como la expansión de la palma de aceite y las plantaciones de arroz, debido a que se estableció la agricultura intensiva a gran escala (Romero-Ruiz et al., 2012). Diversos estudios mencionan una extensión de millones de hectáreas que tienen potencial uso en silvicultura, ganadería y cultivos en la altillanura de la Orinoquía (Fontanilla-Díaz et al., 2021) debido a su capacidad agropecuaria y forestal (CONPES 3797, 2014). El DNP prevé pasar de 810.00 ha sembradas con arroz, soya, sorgo y palma de aceite en 2012 a 780.000 en 2024 para aumentar el PIB nacional en 0,4 puntos porcentuales (CONPES 3797, 2014).

El potencial agropecuario, ganadero y forestal de las sabanas de la Orinoquia y su riqueza ecológica resaltan la importancia de analizar los cambios en los usos del suelo y generar información técnica para la gestión eficiente del uso del suelo en el territorio. Entre los factores que pueden alterar las dinámicas naturales de las sabanas de la Orinoquía se destacan la plantación de palma de aceite, plantación de otros cultivos, introducción de pastos exóticos, control de

incendios naturales (Armenteras et al., 2005), ganadería intensiva (Fontanilla-Díaz et al., 2021), minería y exploración y explotación de hidrocarburos (Romero-Ruíz et al., 2012).

Las misiones Landsat cuentan con bandas que permiten estimar diferentes índices espectrales como el índice de vegetación normalizada (NDVI; Almeida de Souza et al., 2020), el índice de vegetación mejorada (EVI; Santana et al., 2020), el índice diferencial de agua normalizado (NDWI; Ivo et al., 2020), entre otros. Ramírez-Cuesta et al., (2021), combinan imágenes del satélite MODIS con series de tiempo de NDVI para caracterizar procesos terrestres ocurridos entre 2000 y 2018. Con el uso de uno o varios de estos índices es posible conocer información puntual sobre el estado de la cubierta vegetal o los cuerpos de agua, sin necesidad de tomar mediciones in situ, sin embargo, debido a que los sensores pasivos como el Landsat operan en la longitud de onda visible e infrarroja, el clima y la alta nubosidad los afectan negativamente (Horning, 2008). La reflectancia superficial mide la porción de radiación solar entrante que se refleja desde la superficie terrestre hacia el sensor del satélite Landsat (USGS, 2022), mejora la calidad de las imágenes porque tiene en cuenta estos efectos.

Tradicionalmente cuando se analizan cambios de uso del suelo lo que se hace es comparar el mismo espacio físico en diferentes ventanas temporales y se crean matrices de cambio de uso del suelo, determinando el valor, el lugar y la naturaleza del cambio (Romero-Ruíz et al., 2012); generalmente se limitan al cambio neto. Con estas matrices es posible estimar la persistencia, la ganancia bruta, la pérdida bruta, el cambio neto, el intercambio y el cambio total entre los diferentes usos del suelo. La persistencia es todo lo que no cambia de uso del suelo entre ambos periodos de tiempo, es decir, el valor de la diagonal principal para cada uso (Tabla 1; P_{ij}); la ganancia bruta es todo lo que inicialmente no era cierto uso del suelo pero luego se transformó en ese cierto uso, es decir, la sumatoria de toda la columna sin contar la persistencia (F_7); la pérdida bruta es todo lo que inicialmente era cierto uso del suelo, pero luego se transformó en un uso del suelo diferente, es decir, la sumatoria de toda la fila sin considerar la persistencia (C_7); el cambio neto es el valor absoluto de la diferencia entre la extensión inicial y la final (C_8); el intercambio es el doble del valor más pequeño entre la ganancia bruta y la pérdida bruta, es decir, el valor que simultáneamente se gana y se pierde (C_9); el cambio total es la suma entre las ganancias brutas y las pérdidas brutas, es decir, cuando un píxel cambia su uso del suelo indiferente de su dirección de cambio (C_{10}). Las diferentes estimaciones son importantes porque permiten identificar diferentes indicadores de cambio; por ejemplo, un cambio neto cero no implica que no hubo cambios, es posible que un uso

del suelo haya perdido y ganado simultáneamente la misma cantidad de hectáreas en diferentes lugares y tenga un intercambio diferente de cero.

Tabla 1. *Matriz de cambio de uso del suelo. Adaptado de Pontius et al., (2004).*

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
F_1		<i>clase 1</i>	<i>clase 2</i>	...	<i>clase n</i>	Total T_1	Pérdidas brutas (L_{ij})	Cambio Neto	Intercambio	Cambio Total
F_2	<i>clase 1</i>	P_{11}	P_{12}	...	P_{1n}	P_{1+}	$P_{1+} - P_{11}$	$|P_{1+} - P_{+1}|$	$2 \times \text{MIN}(P_{1+} - P_{11}, P_{+1} - P_{11})$	$(P_{1+} - P_{11}) + (P_{+1} - P_{11})$
F_3	<i>clase 2</i>	P_{21}	P_{22}	...	P_{2n}	P_{2+}	$P_{2+} - P_{22}$	$|P_{2+} - P_{+2}|$	$2 \times \text{MIN}(P_{2+} - P_{22}, P_{+2} - P_{22})$	$(P_{2+} - P_{22}) + (P_{+2} - P_{22})$
F_4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F_5	<i>clase n</i>	P_{n1}	P_{n2}	...	P_{nn}	P_{n+}	$P_{n+} - P_{nn}$	$|P_{n+} - P_{+n}|$	$2 \times \text{MIN}(P_{n+} - P_{nn}, P_{+n} - P_{nn})$	$(P_{n+} - P_{nn}) + (P_{+n} - P_{nn})$
F_6	Total T_2	P_{+1}	P_{+2}	...	P_{+n}	P				
F_7	Ganancias brutas (G_{ij})	$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	...	$P_{+n} - P_{nn}$					

4 Metodología

El área de estudio (Fig. 1), se definió utilizando el mapa de Ecoregiones de Dinerstein et al., (2017), y tiene una extensión de 152.690 km². Se tomaron 7 categorías que agrupan los diferentes usos del suelo en la región; 4 usos del suelo son naturales (Sabanas, Bosques, Cuerpos de agua y Afloramientos rocosos) y 3 son no naturales (Cultivos y pastos, Palma de aceite e Infraestructura). La metodología se resume gráficamente en la Fig. 2. Se usaron imágenes para el periodo entre 1999 y 2022 de Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 con reflectancia de la superficie corregida atmosféricamente y resolución espacial y temporal de 20 m y 16 días respectivamente.

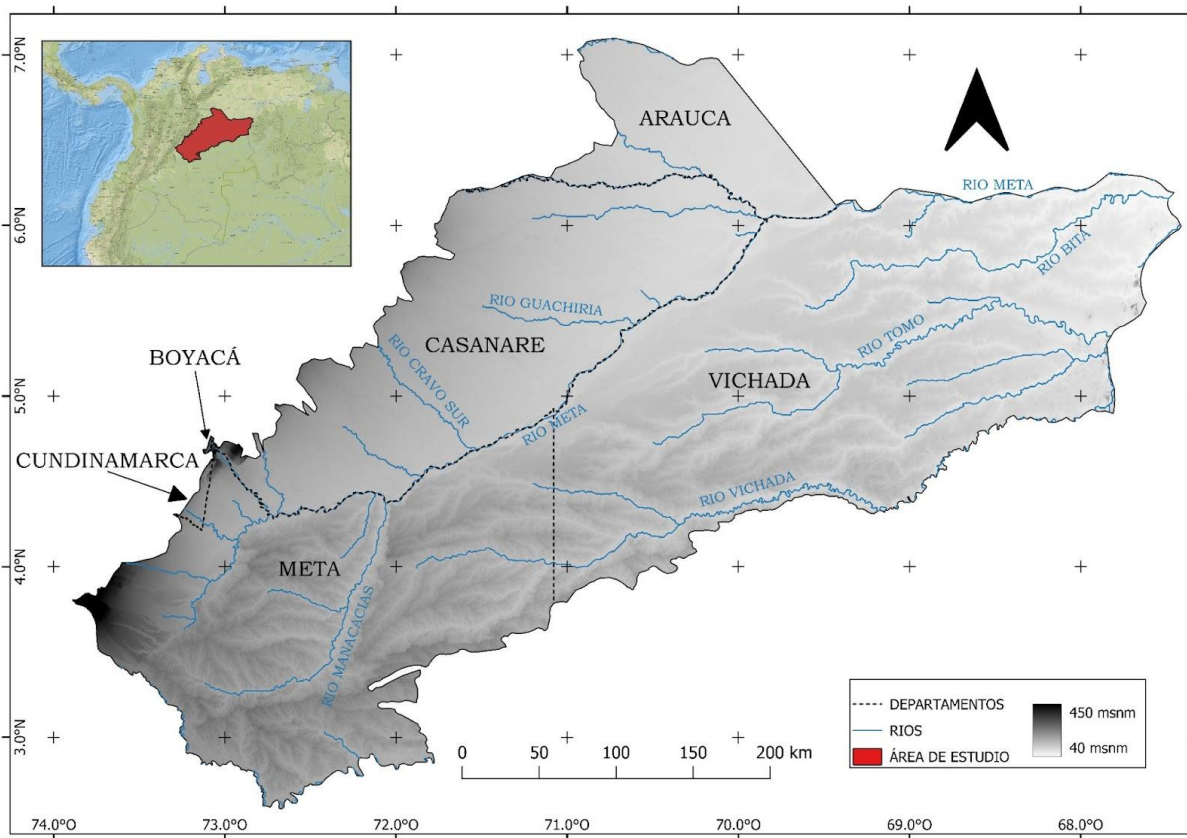


Fig. 1. Localización general de las sabanas de La Orinoquia, Colombia.

Se dividieron las imágenes entre temporada húmeda (mayo 1 y septiembre 1) y temporada seca (diciembre 1 y abril 1) para cada periodo de análisis (1999 a 2002, 2003 a 2006, 2007 a 2010,

2011 a 2014, 2015 a 2018, y 2019 2022; por simplicidad de ahora en adelante se hará referencia a estos periodos como 2002, 2006, 2010, 2014, 2018 y 2022). Se filtraron los píxeles con nubes y sombra de nubes con confianza mediana y alta según el QA_PIXEL de los metadatos de las imágenes. Se compuso, para cada periodo, una imagen usando el valor de la moda (valor más común de cada banda) de cada píxel para la temporada húmeda en cada periodo analizado; se tomaron 4 años para cada composición, correspondientes con los periodos de gobierno sucesivos en el país. Aún con este intervalo de tiempo relativamente amplio, el porcentaje de píxeles sin información para el área de estudio varía entre el 0,08 % y 3,88 % (Tabla 2), los cuales se completaron empleando las composiciones para la temporada seca (etapa de Preprocesamiento en Fig. 2).

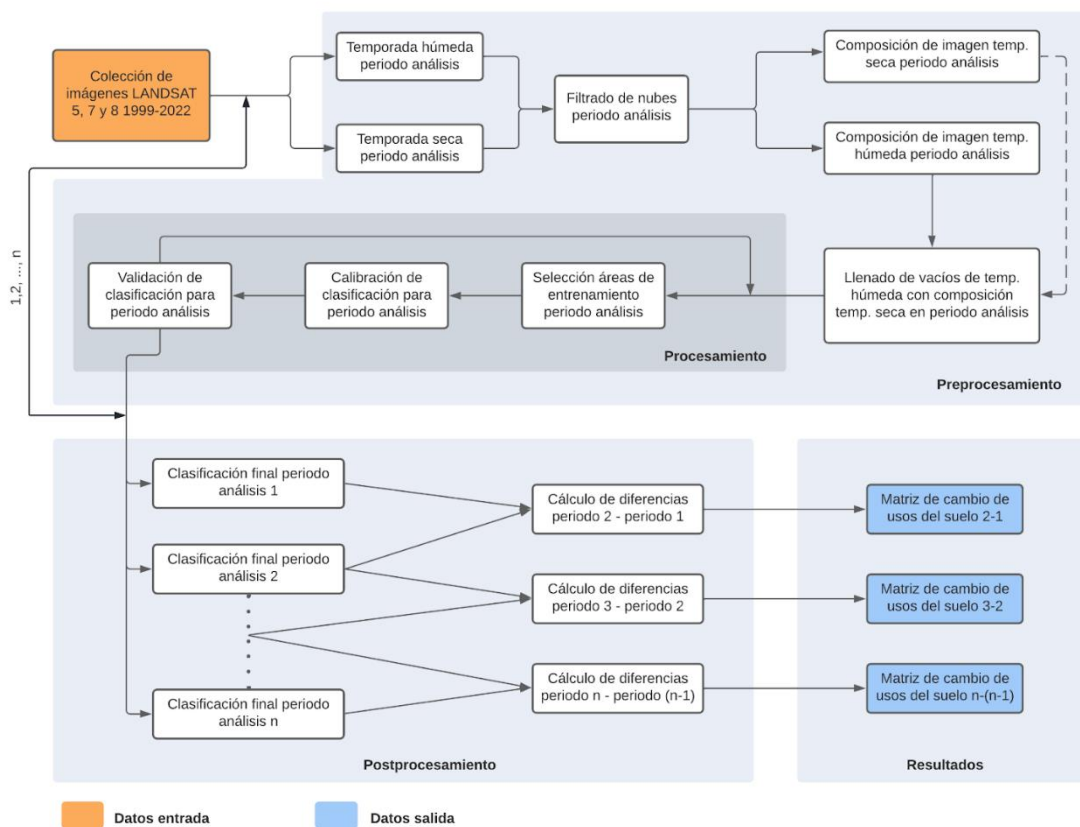


Fig. 2. Esquema de la metodología empleada.

Se utilizó una clasificación supervisada para procesar el área de estudio; el 80 % de los sitios de entrenamiento se utilizaron para calibrar el clasificador Random Forest con entre 16 y 45

árboles de decisiones y el 20 % se usó en la validación. Estos puntos se seleccionaron con conocimiento previo del área y apoyo de otras fuentes de información secundaria para guiar la clasificación. El Estadístico Kappa se empleó para cuantificar la precisión de la clasificación según los sitios de entrenamiento tanto en la calibración como en la validación de todos los periodos de análisis. Este índice ha sido empleado en múltiples trabajos (Nasir et al., 2022; Li et al., 2022; Romero-Ruíz et al., 2012) y se consideran bueno cuando es mayor al 60 % (Meidinger, 2003) (etapa de Procesamiento en Fig. 2).

Para las imágenes con los usos del suelo clasificados (seis en total), se calcularon las diferencias entre los diferentes periodos (post procesamiento). Se crearon 5 matrices de cambio de uso del suelo para cuantificar los cambios en los 6 períodos de análisis. Las matrices se presentan siguiendo el formato de Romero-Ruíz et al., (2012); se consideraron 42 direcciones para el cambio además de la persistencia, que se identifica a cuál uso del suelo pertenece cuando se resta la extensión del año inicial y la pérdida bruta de cada uso del suelo (etapa de Resultados en Fig. 2).

5 Resultados

5.1. Preprocesamiento, calibración y validación.

Los años con mayor cantidad de datos faltantes son 2002, 2006 y 2010 (Tabla 2). En estos años no se había lanzado Landsat 8, por lo que se compuso la imagen solamente con Landsat 5 y 7. En enero de 2013 finaliza la misión 5 de Landsat y en abril de 2013 se lanza Landsat 8, continuando en operación para el 2022 junto con Landsat 7. En todos los años se tuvo un buen porcentaje de píxeles de la temporada húmeda, la cual es la base para la composición de las imágenes. En las clasificaciones del 2002 y 2006 se tuvo los valores más altos de Kappa, sin embargo, en todas las clasificaciones se tuvo un valor aceptable para el coeficiente. Para la etapa de validación en el 2018 el 17,68 % (Tabla S10) de la palma de aceite se clasificó erróneamente como bosque, dando como resultado este menor valor para el coeficiente Kappa.

Tabla 2. *Porcentaje de píxeles que componen cada imagen de la clasificación final y su respectivo coeficiente Kappa.*

		2002	2006	2010	2014	2018	2022
Píxeles de clasificación final (%)	<i>Temp. Húmeda</i>	97,90%	96,12%	96,36%	99,90%	99,91%	99,19%
	<i>Temp. Seca</i>	2,10%	3,88%	3,64%	0,10%	0,09%	0,81%
Coeficiente Kappa etapa	<i>Calibración</i>	99,00%	99,10%	99,39%	98,96%	98,40%	98,73%
	<i>Validación</i>	90,44%	90,57%	88,57%	85,25%	84,18%	88,53%

5.2. Análisis de cambios en el uso del suelo.

En los 6 periodos analizados el uso del suelo dominante fue sabana con más del 50 % del área, seguido de cultivos y pastos (~18,74 % \pm 2,86 %), y bosque (~13,05 % \pm 1,48 %) (Fig. 3). En los restantes 4 usos del suelo se encuentra menos del 15 % del área de estudio. Los usos del suelo naturales (sabanas, bosque, afloramientos rocosos y cuerpos de agua) en 2002 tenían una extensión de más del 80 %. Sin embargo, para el 2022 disminuyeron en cerca de 470000 hectáreas, las cuales principalmente se transformaron en palma de aceite. La palma de aceite tiene su mayor extensión en el 2010, mientras que los cultivos y pastos tienen su menor extensión en este mismo periodo. Según Fedepalma (2013), entre el 2000 y el 2010 la palma de aceite aumentó en cerca del 10 % anual en Colombia, pasando de menos de 150000 hectáreas en 1999 a más de 400000 hectáreas en 2010; para el año 2012, solo en Meta (31 %) y Casanare (8,7 %) se encontraba sembrada el 39,7 % de toda la palma de aceite en Colombia. Las plantaciones se concentran en la

zona occidental del área de estudio, precisamente en los límites entre Meta y Casanare (Fig. 4). Los afloramientos se concentran al oriente de Los Llanos Orientales, concentrándose entre el Río Bitá y el Río Tomo. Los bosques se distribuyen en toda la zona, y en esta categoría destacan los bosques de galería que se encuentran principalmente al sur del río Meta.

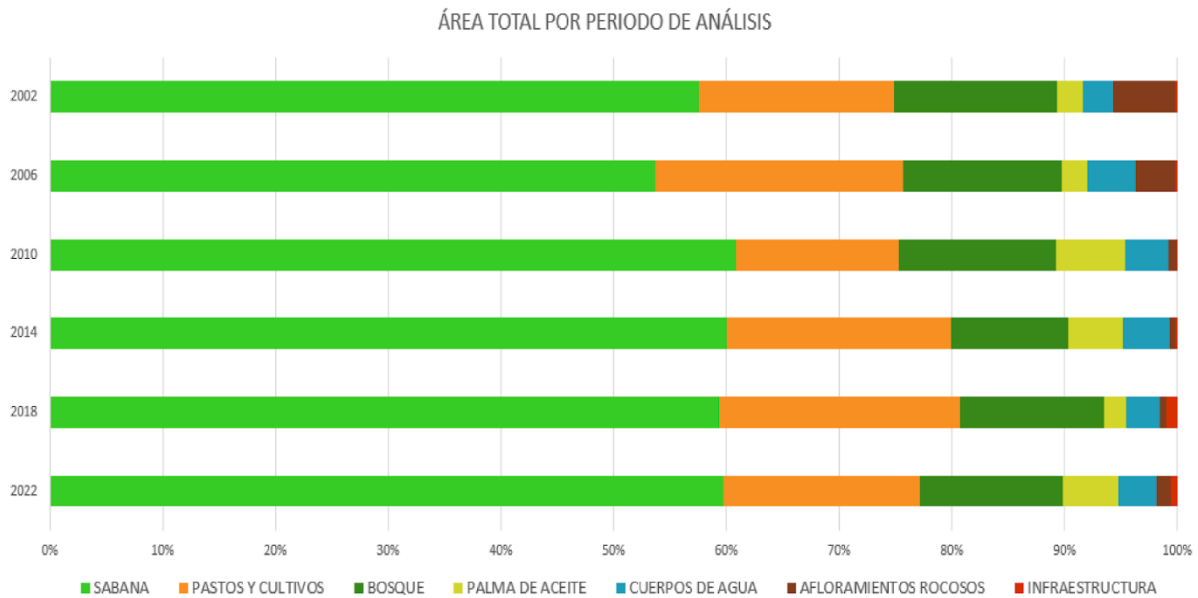


Fig. 3. Porcentaje del área total de cada uso del suelo por periodo analizado.

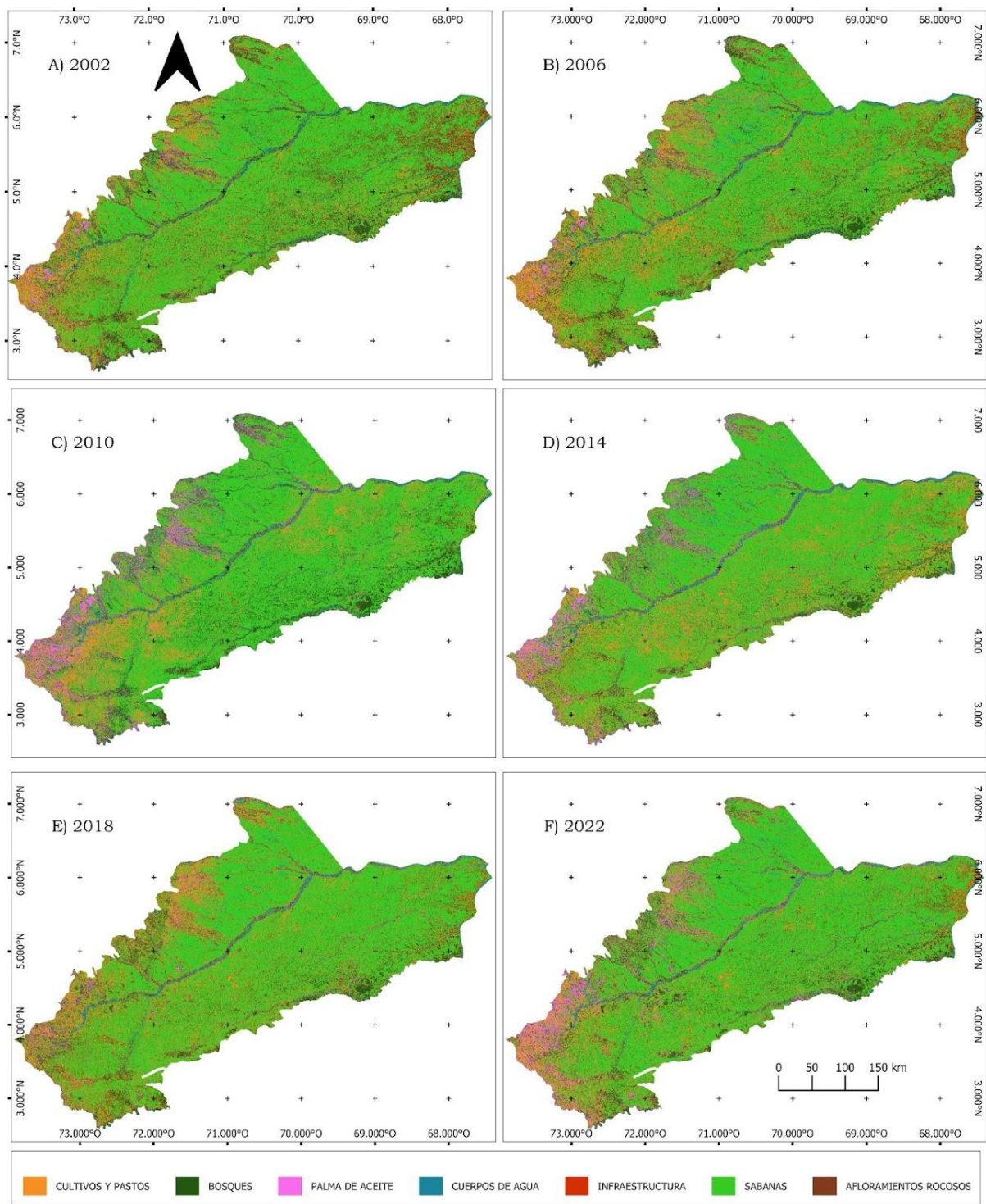


Fig. 4. Clasificación final de cada periodo analizado. A) 2002. B) 2006. C) 2010. D) 2014. E) 2018. F) 2022.

5.3. Persistencia, ganancia bruta y pérdida bruta

La persistencia es considerablemente mayor en las sabanas que en los demás usos del suelo porque este concepto está basado en la extensión total del área de estudio, no es con base en el 100 % de un uso del suelo específico (Fig. 5).

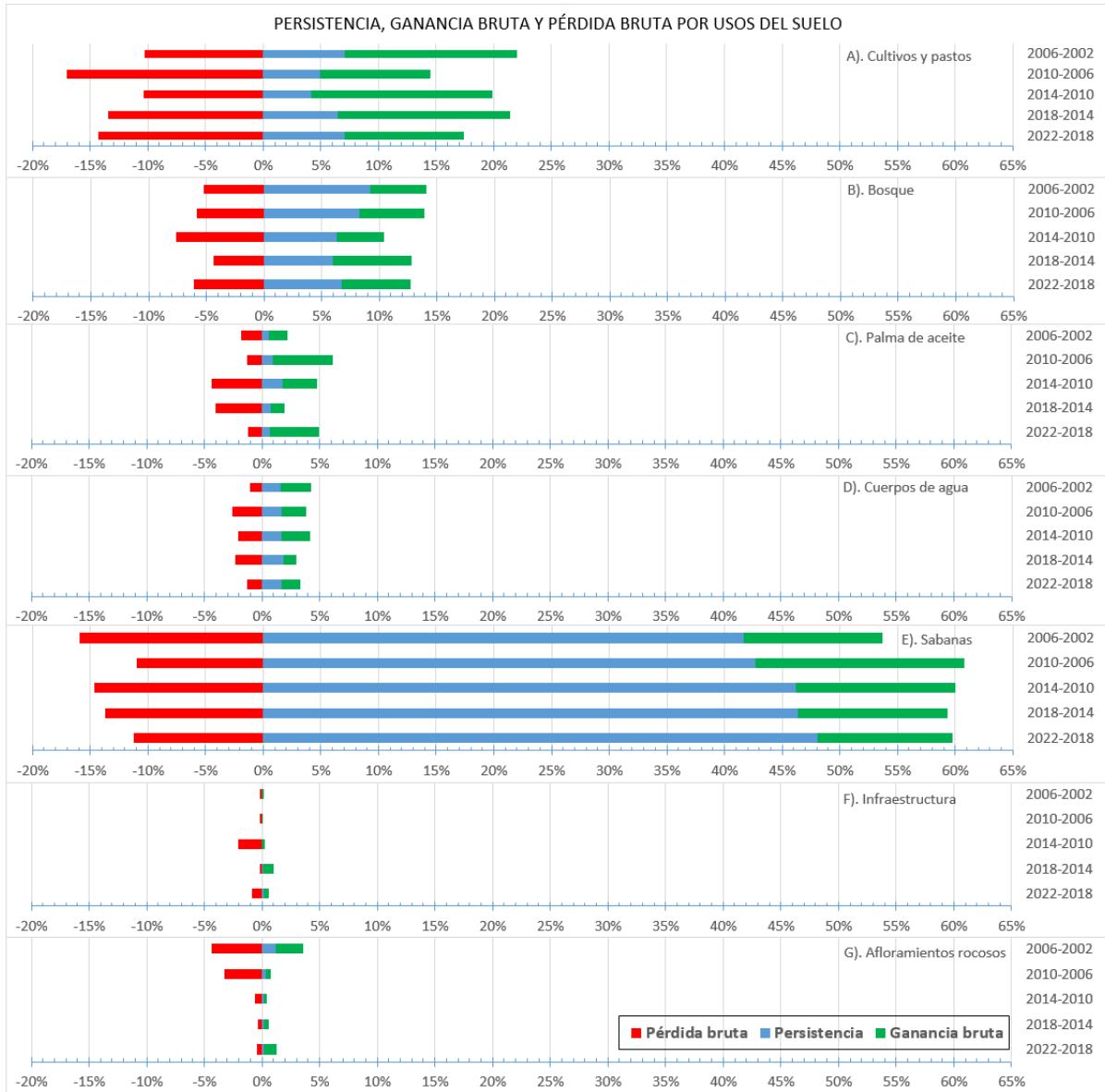


Fig. 5. Persistencia, ganancia bruta y pérdida bruta de cada uso del suelo en todos los periodos analizados. Este concepto está basado en la extensión total del área de estudio, no es con base en el 100 % de un uso del suelo específico.

La pérdida bruta de las sabanas es la mayor de todos los usos (13,27 % ± 2,14 %), evidenciando que en todos los periodos de estudio analizado se dieron transformaciones

importantes desde esta categoría hacia las demás. Sin embargo, también es la categoría con mayor ganancia bruta ($13,72 \% \pm 2,59 \%$), lo que en valores absolutos podría compensar las pérdidas y al ser el uso más extenso, es la clase desde la cual más hectáreas se transforman. Las pérdidas brutas y ganancias brutas de los cultivos y pastos son del mismo orden de magnitud que las sabanas ($13,08 \% \pm 2,84 \%$ y $13,10 \% \pm 2,94 \%$, respectivamente), lo que implica que aproximadamente 7 de cada 10 hectáreas que inicialmente eran cultivos y pastos, se transformaron a otro uso del suelo. Las hectáreas de cultivos y pastos que se perdieron en su mayor parte se transformaron en sabanas ($9,14 \% \pm 1,75 \%$), igualmente que las hectáreas que se ganaron en su mayor parte se transformaron desde las sabanas ($9,06 \% \pm 1,86 \%$).

5.4. Cambio neto

Los afloramientos rocosos (o suelo desnudo) pierden extensión gradualmente desde el periodo 2002 ($5,58 \%$) hasta 2014 ($0,46 \%$); y aunque en 2018 y 2022 se da un leve incremento ($0,61 \%$ y $1,30 \%$, respectivamente) no se recupera la extensión inicial (Fig. 6). El cambio neto que se da en las sabanas y el que se da en los cultivos y pastos parecen tener correlación y ser inversamente proporcionales (coeficiente de correlación de Spearman de $-0,6$). En el 2006, las sabanas pierden $3,84 \%$ (586380 ha) de su extensión respecto al periodo inmediatamente anterior, y los cultivos y pastos ganan $4,66 \%$ (711097 ha); para el 2010 las sabanas ganan $7,13 \%$ ($1'088854$ ha) de extensión mientras que los cultivos y pastos pierden $7,5 \%$ ($1'144819$ ha). En los demás periodos se da la misma tendencia: cuando las sabanas pierden extensión, los cultivos y pastos aumentan su área (Fig. 6). Los bosques presentan un marcado cambio en su área de 2010 ($13,89 \%$) a 2014 ($10,40 \%$), lo cual implica una reducción de $3,5 \%$ o $533802,51$ ha. Aunque para el 2018 hay un aumento importante ($2,4 \%$ o $366035,82$ ha) no ha recuperado su extensión inicial en el 2022.

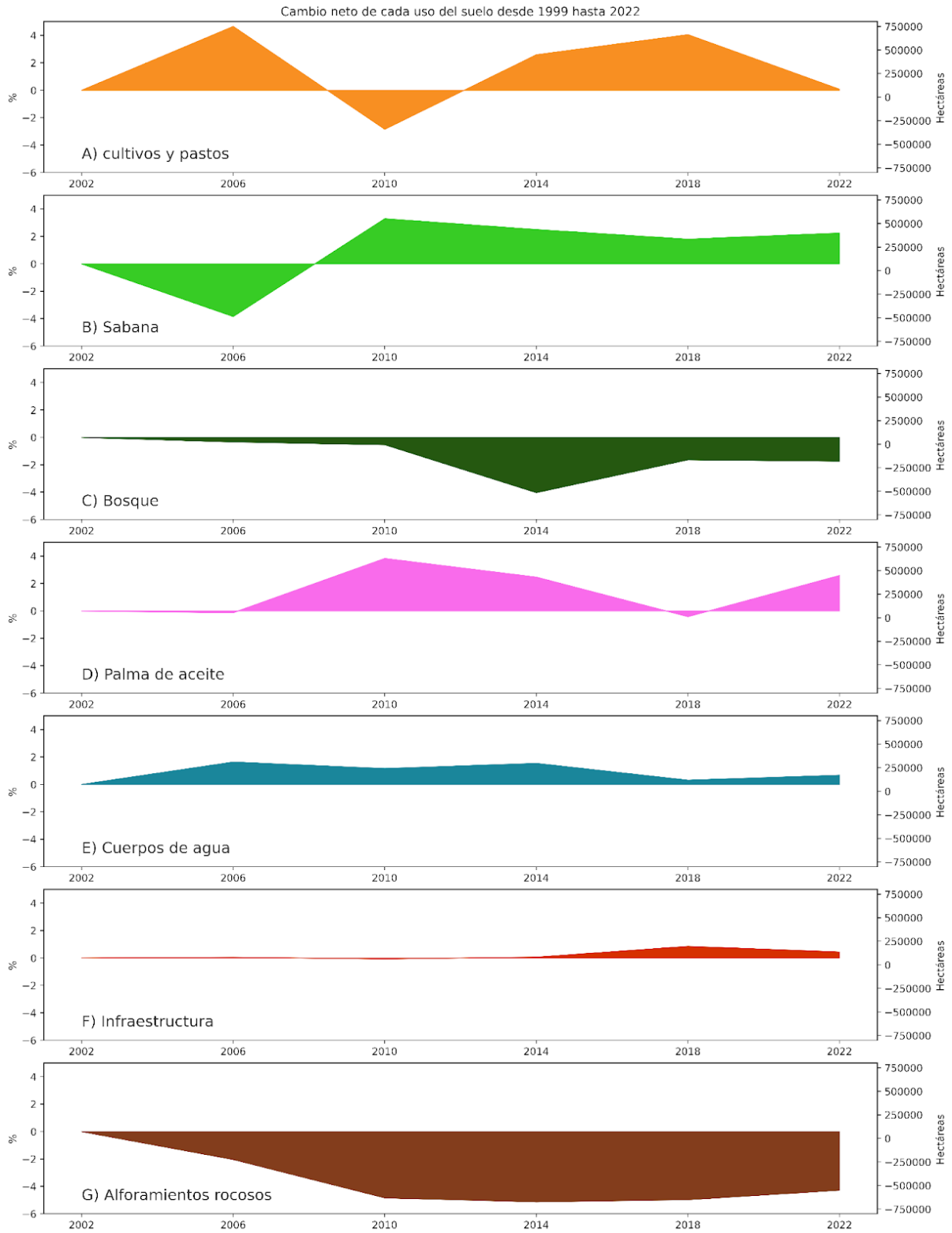


Fig. 6. Cambio neto para cada uso del suelo en cada periodo compuesto.

5.5. Intercambio y cambio total

Así como para las sabanas el cambio neto entre el 2002 y el 2006 fue de 3,84 % (~586000 ha), el intercambio fue del 24,09 % (~3'678000 ha), lo cual implica que ~ 1'840000 ha se transformaron de sabana a otra categoría, además, que otras ~ 1'840000 ha se transformaron en sabana desde otros usos del suelo (Tabla. 3). En ese mismo periodo, el cambio total fue de 27,93 %, resultando en que ~4'264000 se transformaron en sabanas o dejaron de serlo. En general, los cultivos y pastos y las sabanas presentan los valores más altos de intercambio y cambio total, seguido de los bosques; los demás usos del suelo tienen un intercambio y cambio total menor al 4% y 6%, respectivamente.

Tabla 3. Intercambio de cada uso del suelo a través de los años.

INTERCAMBIO	2006-2002	2010-2006	2014-2010	2018-2014	2022-2018
<i>cultivos</i>	20,57%	19,05%	20,72%	26,93%	20,60%
<i>bosque</i>	9,78%	11,26%	8,20%	8,77%	11,90%
<i>palma</i>	3,30%	2,58%	5,99%	2,36%	2,46%
<i>agua</i>	2,10%	4,28%	4,15%	2,19%	2,52%
<i>infraestruc</i>	0,29%	0,16%	0,16%	0,30%	0,90%
<i>sabana</i>	24,09%	21,94%	27,67%	25,92%	22,45%
<i>suelo</i>	4,66%	0,84%	0,65%	0,67%	0,86%

Tabla 4. Cambio total de cada uso del suelo para los periodos analizados.

CAMBIO TOTAL	2006-2002	2010-2006	2014-2010	2018-2014	2022-2018
<i>cultivos</i>	25,22%	26,54%	26,15%	28,40%	24,58%
<i>bosque</i>	10,12%	11,46%	11,69%	11,17%	11,99%
<i>palma</i>	3,43%	6,53%	7,35%	5,23%	5,46%
<i>agua</i>	3,73%	4,75%	4,53%	3,41%	2,88%
<i>infraestruc</i>	0,34%	0,28%	0,29%	1,09%	1,31%
<i>sabana</i>	27,93%	29,07%	28,46%	26,62%	22,90%
<i>suelo</i>	6,69%	3,64%	0,94%	0,82%	1,55%

6 Análisis

La meta del DNP de tener en La Orinoquía colombiana sembradas 780.000 ha para 2024 está próxima a materializarse ya que para el año 2022 ya se tiene una cifra cercana al 90 % (751.275,82 ha) de cumplimiento (Tabla S19). Si bien con los resultados obtenidos no es posible afirmar que se está transformando sistemáticamente el bosque en palma de aceite, sí se evidencia que, de periodo a periodo, en promedio 250.000 ha de bosque pasan a ser palma de aceite. Los cultivos y pastos son también una categoría que periodo a periodo registró una transformación importante en Palma de aceite.

La persistencia en todos los periodos de análisis en los cultivos y pastos, y en la Palma de aceite, respecto a sus pérdidas brutas y ganancias brutas son las más bajas de todos los usos del suelo (Fig. 5). Esto indica lo dinámico que son estas categorías en el tiempo; constantemente se están incorporando áreas nuevas y descartando áreas antiguas para producción agraria. Las áreas que se transforman en palma de aceite lo hacen principalmente desde los bosques y otros cultivos y pastos. A su vez, cuando la zona de palma de aceite se transforma, generalmente lo hace en bosques y cultivos y pastos. Análogamente, los cultivos y pastos tienen su origen en hectáreas de sabanas y cuando se descartan, retornan a ser sabanas.

Esta dinámica entre la categoría de cultivos y pastos, y la categoría de sabanas, es la causa principal de los valores de intercambio que se dan en estas categorías (Fig. 6 y Tabla 3). Esta observación está soportada en el alto valor del coeficiente de correlación de Spearman ($r = -0,6$) para el cambio neto. Es importante analizar el valor de cambio neto a la par del intercambio y/o el cambio total; cuando se analiza el cambio neto sin tener en cuenta los demás tipos de cambio, se pasa por alto variaciones importantes en la composición del área de estudio y se sobrestima o se subestima las transformaciones que se dan.

La respuesta espectral de las sabanas y los pastos para ganadería resulta en ocasiones similar; es posible que estos cambios están siendo sobrestimados puesto que en la etapa de configuración del modelo en algunos periodos se obtuvo un error mayor al 10 % (Tabla S6). Esto, además ocurre en ocasiones entre las sabanas y los cultivos y pastos. Sin embargo, los resultados obtenidos para la calibración y validación de las imágenes ($Kappa > 84\%$) se pueden considerar como satisfactorias y son similares a los reportados en la literatura (Nasir et al., 2022; Li et al., 2022; Romero-Ruíz et al., 2012).

Toda la información utilizada en este trabajo fue recopilada de estudios previos, publicaciones técnicas de entidades estatales y regionales, y de imágenes satelitales que, aunque permitieron una buena configuración, deja abierta la discusión sobre la magnitud real de las dinámicas naturales y artificiales de La Orinoquía colombiana. Los resultados de este trabajo pueden beneficiarse de información de campo para, por ejemplo, mejorar la capacidad de diferenciar otros tipos de uso del suelo. Por ejemplo, en la zona se encuentran sabanas con diferentes dinámicas como las sabanas inundables, las sabanas arenosas o las sabanas altas, que se clasificaron en una misma categoría pero que tienen diferencias en su estructura y función. Tomando como referencia principal a Romero-Ruíz et al., (2012), se redujo los usos del suelo de 11 a 7. Esta disminución en la cantidad de usos se tomó además al considerar la extensión de algunas de ellas, por ejemplo 0,84 % de vegetación secundaria (Romero-Ruíz et al., 2012).

Para futuros estudios, se recomienda que se reduzca el rango temporal en la composición de las imágenes, pues al crear un mosaico con 4 años se limita la capacidad para analizar las dinámicas de cambio en el uso del suelo. Por ejemplo, se puede presentar el caso en que, en un determinado píxel, quede la información del primer año en la primera composición, del cuarto año para la segunda composición y del primer año en la tercera composición, por lo que al calcular el cambio que se da no se estén tomando iguales ventanas de tiempo; es decir, un píxel tiene la información de 1999, de 2006 y de 2007, por lo que en la primera matriz de cambio pasan 7 años mientras que en la segunda matriz solo 1 año.

La desventaja de reducir el rango temporal es que pueden quedar más píxeles enmascarados en la composición final, por lo que se debe incluir más píxeles de la temporada seca o utilizar técnicas de llenado de datos avanzadas para interpolar un área más extensa. Si se pretende tomar como base este trabajo y realizar comparaciones, se recomienda emplear la temporada húmeda porque entre la temporada húmeda y la temporada seca se encontraron diferencias importantes en la clasificación de los usos del suelo. Finalmente, en este trabajo se utilizaron imágenes de las misiones Landsat, pero no son las únicas imágenes satelitales disponibles. Las misiones Sentinel, MODIS, GEDI, entre otras, pueden ayudar a mejorar la confianza en la configuración del modelo.

7 Conclusiones

El uso del suelo que más transformación tiene desde 1999 hasta 2022 en Los Llanos Orientales de Colombia es la sabana, se evidencia periodo a periodo donde más de 1'500000 ha cambian de categoría. La palma de aceite es sembrada predilectamente en el suroriente del área de estudio, entre los departamentos de Casanare y Meta; en este último, también se está explotando su potencial agrario.

Referencias

- Acker, J., Williams, R., Chiu, L., Ardanuy, P., Miller, S., Schueler, C., Vachon, P., & Manore, M. (2014). *Remote Sensing from Satellites, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09440-9>
- Almeida De Souza, A., Galvão, L. S., Korting, T. S., & Prieto, J. D. (2020). *Dynamics of savanna clearing and land degradation in the newest agricultural frontier in Brazil*. *GIScience & Remote Sensing*, 57(7), 965–984. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1835080>
- Armenteras, D., Romero, M., & Galindo, G. (2005). *Vegetation fire in the savannas of the Llanos Orientales of Colombia*. *World Resource Review*, 17.
- Cabrera-Amaya, D. M., Giraldo-Kalil, L. J., Rivera-Díaz, O., & Castro-Lima, F. (2020). *Riqueza, composición y distribución de las plantas vasculares en sabanas y bosques ribereños de la cuenca baja del río Pauto (Casanare-Colombia)*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 1018–1032. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1188>
- Conciani, D. E., Santos, L. P. D., Silva, T. S. F., Durigan, G., & Alvarado, S. T. (2021). *Human-climate interactions shape fire regimes in the Cerrado of São Paulo state, Brazil*. *Journal for Nature Conservation*, 61, 126006. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.126006>
- CONPES 3794. (2014). *Política para el desarrollo industrial de la Orinoquía: altillanura - fase I*. Departamento Nacional de Planeación.
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N. D., Wikramanayake, E., Hahn, N., Palminteri, S., Hedao, P., Noss, R., Hansen, M., Locke, H., Ellis, E. C., Jones, B., Barber, C. V., Hayes, R., Kormos, C., Martin, V., Crist, E., . . . Saleem, M. (2017). *An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm*. *BioScience*, 67(6), 534–545. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix014>
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2013). *La Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia*. Recuperado 27 de marzo de 2022, de <https://web.fedepalma.org/bigdata/zonaprivada/laagroindustriadelapalmadeaceiteencolombia.pdf>
- Fontanilla-Díaz, C. A., Preckel, P. V., Lowenberg-DeBoer, J., Sanders, J., & Peña-Lévano, L. M. (2021). *Identifying profitable activities on the frontier: The Altillanura of Colombia*. *Agricultural Systems*, 192, 103199. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103199>
- Giles, A. L., Flores, B. M., Rezende, A. A., Weiser, V. D. L., & Cavassan, O. (2021). *Thirty years of clear-cutting maintain diversity and functional composition of woody-encroached Neotropical savannas*. *Forest Ecology and Management*, 494, 119356. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119356>

- González-Alonso, F., Franco, C., Vargas, F., & Armenteras, D. (2013). *A new algorithm for mapping burned areas in Colombia*. *Agronomía Colombiana*, 31(2), 234-242. Retrieved October 04, 2021, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652013000200013&lng=en&tlng=en.
- Horning, N. (2008). *Remote Sensing*. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 2986–2994. <https://doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00237-8>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. IDEAM, Bogotá D.C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia, versión 2.1, escala 1:100000*. IDEAM, Bogotá D.C.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (1997). *Informe nacional sobre el estado de la biodiversidad Colombia, Tomo I, Diversidad Biológica*. https://www.researchgate.net/profile/Andres-Etter/publication/266385520_Ecosistemas_de_Sabanas/links/542ec4f10cf29bbc126f57fc/Ecosistemas-de-Sabanas.pdf
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2015). *Colombia Anfibia, Un país de humedales*. Volumen I / editado por Úrsula Jaramillo Villa, Jimena Cortés-Duque y Carlos Flórez-Ayala, Bogotá.
- Ivo, I. O., Biudes, M. S., Vourlitis, G. L., Machado, N. G., & Martim, C. C. (2020). *Effect of fires on biophysical parameters, energy balance and evapotranspiration in a protected area in the Brazilian Cerrado*. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100342. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100342>
- Li, D., Shen, X., Guan, H., Yu, Y., Wang, H., Zhang, G., Li, J., & Li, D. (2022). *AGFP-Net: Attentive geometric feature pyramid network for land cover classification using airborne multispectral LiDAR data*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102723. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102723>
- Meidinger, D. (2003). *Protocol for accuracy assessment of ecosystem maps*. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Tech. Rep. 011.
- Mora-Fernández, C., Peñuela-Recio, L., & Castro-Lima, F. (2015). *Estado del conocimiento de los ecosistemas de las sabanas inundables en la Orinoquia Colombiana*. *Orinoquia*, 19(2), 253-271. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-37092015000200012&lng=en&tlng=
- Nasir, S. M., Kamran, K. V., Blaschke, T., & Karimzadeh, S. (2022). *Change of land use / land cover in kurdistan region of Iraq: A semi-automated object-based approach*. *Remote*

Sensing Applications: Society and Environment, 26, 100713.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100713>

Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). *Detecting important categorical land changes while accounting for persistence*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>

Ramírez-Cuesta, J., Minacapilli, M., Motisi, A., Consoli, S., Intrigliolo, D., & Vanella, D. (2021). *Characterization of the main land processes occurring in Europe (2000–2018) through a MODIS NDVI seasonal parameter-based procedure*. Science of The Total Environment, 799, 149346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149346>

Rangel - Ch., J. O. (2015). *La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 39(51), 176. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.136>

Read, J., & Torrado, M. (2009). *Remote Sensing*. International Encyclopedia of Human Geography, 335–346. <https://doi.org/10.1016/b978-008044910-4.00508-3>

Romero-Ruiz, M., Flantua, S., Tansey, K., & Berrio, J. (2012). *Landscape transformations in savannas of northern South America: Land use/cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia*. Applied Geography, 32(2), 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.010>

Santana, N. C., Júnior, O. A. D. C., Gomes, R. A. T., & Fontes Guimarães, R. (2020). *Comparison of Post-fire Patterns in Brazilian Savanna and Tropical Forest from Remote Sensing Time Series*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(11), 659. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110659>

Soto Vega, P. J., Costa, G. A. O. P. D., Feitosa, R. Q., Ortega Adarme, M. X., Almeida, C. A. D., Heipke, C., & Rottensteiner, F. (2021). *An unsupervised domain adaptation approach for change detection and its application to deforestation mapping in tropical biomes*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 181, 113–128. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.08.026>

Townshend, J. (2001). *Landsat Imagery in Geography*. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences, 8265–8270. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043076-7/02527-4>

U.S. Geological Survey. (2015). *Landsat Surface Reflectance*. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-reflectance>

Anexos

Valores kappa 2002

Tabla S1. Matriz de confusión periodo 2002.

Calibración 2002	CULTIVOS Y PASTOS	BOSQUE	PALMA DE ACEITE	CUERPOS DE AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	AFLORAMIENTOS ROCOSOS
CULTIVOS Y PASTOS	99,05%	0,09%	0,05%	0,00%	0,00%	0,63%	0,18%
BOSQUE	0,22%	99,39%	0,28%	0,00%	0,00%	0,11%	0,01%
PALMA DE ACEITE	0,16%	1,01%	98,81%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%
CUERPOS DE AGUA	0,07%	0,27%	0,03%	99,43%	0,00%	0,20%	0,00%
INFRAESTRUCTURA	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	99,27%	0,34%	0,34%
SABANA	0,43%	0,03%	0,00%	0,01%	0,01%	99,40%	0,12%
AFLORAMIENTOS ROCOSOS	0,21%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,39%	99,38%

Tabla S2. Matriz de error periodo 2002.

Validación 2002	CULTIVOS Y PASTOS	BOSQUE	PALMA DE ACEITE	CUERPOS DE AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	AFLORAMIENTOS ROCOSOS
CULTIVOS Y PASTOS	87,19%	1,30%	0,46%	0,03%	0,06%	8,94%	2,01%
BOSQUE	1,66%	93,52%	4,01%	0,01%	0,00%	0,77%	0,04%
PALMA DE ACEITE	1,05%	8,67%	90,17%	0,03%	0,00%	0,08%	0,00%
CUERPOS DE AGUA	0,51%	1,29%	0,10%	96,25%	0,04%	1,79%	0,02%
INFRAESTRUCTURA	1,65%	0,00%	0,00%	0,41%	88,25%	6,39%	3,30%
SABANA	4,19%	0,22%	0,01%	0,14%	0,06%	94,07%	1,31%
AFLORAMIENTOS ROCOSOS	2,47%	0,01%	0,00%	0,02%	0,09%	3,12%	94,30%

Valores kappa 2006

Tabla S3. Matriz de confusión periodo 2006

Calibración 2006	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	99,02%	0,10%	0,04%	0,00%	0,00%	0,68%	0,16%
BOSQUE	0,19%	99,42%	0,25%	0,00%	0,00%	0,13%	0,01%
PALMA	0,13%	0,92%	98,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
AGUA	0,09%	0,28%	0,01%	99,38%	0,00%	0,25%	0,00%
INFRAESTRUCTURA	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	99,28%	0,55%	0,17%
SABANA	0,41%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	99,43%	0,12%
SUELO	0,18%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,39%	99,41%

Tabla S4. Matriz de error periodo 2006

Validación 2006	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	87,39%	1,16%	0,44%	0,02%	0,04%	8,73%	2,22%
BOSQUE	1,61%	93,52%	3,97%	0,00%	0,00%	0,89%	0,01%
PALMA	1,08%	8,44%	90,42%	0,00%	0,00%	0,06%	0,00%
AGUA	0,53%	1,43%	0,08%	95,79%	0,04%	2,12%	0,02%
INFRAESTRUCTURA	2,15%	0,00%	0,00%	0,00%	90,56%	5,36%	1,93%
SABANA	4,30%	0,23%	0,01%	0,14%	0,05%	94,09%	1,18%
SUELO	2,43%	0,02%	0,01%	0,02%	0,05%	3,29%	94,19%

Valores kappa 2010

Tabla S5. Matriz de confusión periodo 2010

Calibración 2010	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	99,18%	0,15%	0,04%	0,00%	0,00%	0,62%	0,00%
BOSQUE	0,03%	99,53%	0,20%	0,00%	0,00%	0,24%	0,00%
PALMA	0,03%	0,49%	99,44%	0,00%	0,00%	0,03%	0,00%
AGUA	0,09%	0,11%	0,06%	99,42%	0,00%	0,32%	0,00%
INFRAESTRUCTURA	0,69%	0,00%	0,00%	0,20%	99,11%	0,00%	0,00%
SABANA	0,14%	0,04%	0,01%	0,02%	0,00%	99,78%	0,00%
SUELO	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,47%	99,50%

Tabla S6. Matriz de error periodo 2010

Validación 2010	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	83,07%	3,13%	1,15%	0,20%	0,04%	12,33%	0,07%
BOSQUE	1,16%	92,40%	3,84%	0,07%	0,00%	2,51%	0,02%
PALMA	1,38%	7,63%	90,20%	0,04%	0,00%	0,76%	0,00%
AGUA	1,52%	1,29%	0,25%	91,95%	0,08%	4,92%	0,00%
INFRAESTRUCTURA	10,56%	0,00%	0,00%	1,41%	86,27%	1,76%	0,00%
SABANA	3,43%	1,21%	0,31%	0,44%	0,01%	94,47%	0,13%
SUELO	0,89%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	5,96%	93,08%

Valores kappa 2014

Tabla S7. Matriz de confusión periodo 2014

Calibración 2014	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	99,19%	0,14%	0,05%	0,00%	0,01%	0,61%	0,00%
BOSQUE	0,64%	98,59%	0,61%	0,01%	0,00%	0,15%	0,00%
PALMA	0,17%	0,49%	99,29%	0,00%	0,00%	0,05%	0,00%
AGUA	0,10%	0,12%	0,08%	99,28%	0,00%	0,43%	0,00%
INFRAESTRUCTURA	0,99%	0,00%	0,00%	0,00%	98,41%	0,60%	0,00%
SABANA	0,35%	0,03%	0,05%	0,02%	0,00%	99,54%	0,00%
SUELO	0,19%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,19%	99,62%

Tabla S8. Matriz de error periodo 2014

Validación 2014	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	85,75%	4,26%	1,37%	0,13%	0,11%	8,37%	0,02%
BOSQUE	7,38%	85,19%	5,76%	0,13%	0,00%	1,53%	0,00%
PALMA	2,49%	7,28%	89,34%	0,05%	0,01%	0,83%	0,00%
AGUA	1,37%	1,64%	0,88%	90,21%	0,08%	5,83%	0,00%
INFRAESTRUCTURA	8,61%	0,00%	0,29%	0,00%	85,69%	5,40%	0,00%
SABANA	5,79%	0,92%	0,59%	0,50%	0,03%	92,14%	0,02%
SUELO	2,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,82%	95,11%

Valores kappa 2018

Tabla S9. Matriz de confusión periodo 2018

Calibración 2018	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	98,67%	0,50%	0,02%	0,00%	0,00%	0,80%	0,00%
BOSQUE	1,11%	98,56%	0,17%	0,00%	0,00%	0,16%	0,00%
PALMA	0,62%	2,13%	97,23%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%
AGUA	0,19%	0,08%	0,01%	99,31%	0,01%	0,41%	0,00%
INFRAESTRUCTURA	0,44%	0,03%	0,00%	0,00%	98,67%	0,85%	0,00%
SABANA	0,52%	0,09%	0,01%	0,04%	0,02%	99,31%	0,00%
SUELO	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,16%	0,59%	99,25%

Tabla S10. Matriz de error periodo 2018

Validación 2018	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	83,50%	7,24%	0,55%	0,07%	0,10%	8,54%	0,00%
BOSQUE	8,76%	87,28%	2,50%	0,04%	0,00%	1,42%	0,00%
PALMA	4,41%	17,68%	77,73%	0,00%	0,00%	0,18%	0,00%
AGUA	1,59%	0,45%	0,08%	93,62%	0,04%	4,23%	0,00%
INFRAESTRUCTURA	4,32%	0,00%	0,13%	0,00%	86,91%	8,12%	0,52%
SABANA	5,08%	0,78%	0,08%	0,52%	0,08%	93,43%	0,04%
SUELO	0,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,92%	6,65%	92,20%

Valores kappa 2022

Tabla S11. Matriz de confusión periodo 2022

Calibración 2022	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	98,40%	0,21%	0,09%	0,00%	0,02%	1,27%	0,01%
BOSQUE	4,40%	90,06%	4,01%	0,06%	0,00%	1,45%	0,01%
PALMA	3,31%	8,61%	87,65%	0,10%	0,01%	0,33%	0,00%
AGUA	1,02%	0,60%	0,21%	93,43%	0,00%	4,66%	0,08%
INFRAESTRUCTURA	2,68%	0,00%	0,00%	0,73%	91,00%	4,99%	0,61%
SABANA	2,76%	0,96%	0,30%	0,55%	0,01%	95,37%	0,05%
SUELO	0,74%	0,00%	0,00%	0,59%	0,30%	5,03%	93,34%

Tabla S12. Matriz de error periodo 2022

Validación 2022	CULTIVOS/PASTOS	BOSQUE	PALMA	AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANA	SUELO
CULTIVOS/PASTOS	88,37%	4,45%	1,86%	0,04%	0,07%	5,15%	0,06%
BOSQUE	4,40%	90,06%	4,01%	0,06%	0,00%	1,45%	0,01%
PALMA	3,31%	8,61%	87,65%	0,10%	0,01%	0,33%	0,00%
AGUA	1,02%	0,60%	0,21%	93,43%	0,00%	4,66%	0,08%
INFRAESTRUCTURA	2,68%	0,00%	0,00%	0,73%	91,00%	4,99%	0,61%
SABANA	2,76%	0,96%	0,30%	0,55%	0,01%	95,37%	0,05%
SUELO	0,74%	0,00%	0,00%	0,59%	0,30%	5,03%	93,34%

Temporada húmeda vs temporada seca

Tabla s13. Comparación entre temporada seca y temporada húmeda entre 2003-2004-2005

Años 2003 - 2004 - 2005	Temporada seca	Temporada húmeda
Cuerpos de agua	427.943,17	592.780,65
Afloramientos rocosos	1.250.003,12	898.569,43
Bosque	2.069.007,67	2.238.128,99
Cultivos y pastos	2.280.020,96	2.008.145,65
Infraestructura	9.172,59	18.874,83
Palma de aceite	534.980,00	601.015,10
Sabanas	8.697.822,62	7.347.555,83
TOTAL	15.268.950,13	13.705.070,48

Las diferencias en la extensión total se dan precisamente porque para una temporada y otra la cantidad de datos faltantes es diferente.

Cambios en los usos del suelo de temporada húmeda a temporada seca

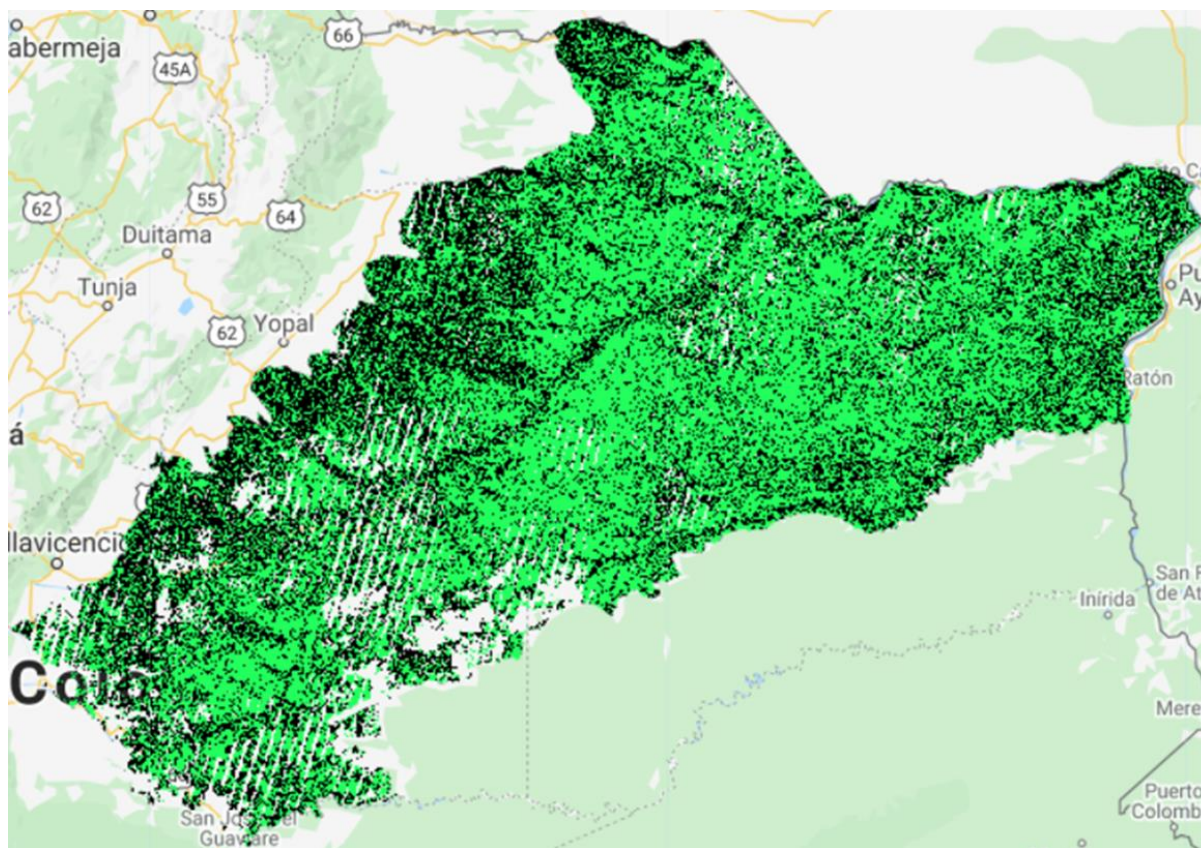


Fig s1. Cambios entre temporada seca y temporada húmeda para el periodo 2003 - 2004 - 2005. Color verde: píxeles que no cambian el uso del suelo de seca a húmeda entre 2003, 2004 y 2005. Color negro: píxeles que sí cambian el uso del suelo de seca a húmeda 2003, 2004 y 2005

Matriz 2002 a 2006

Tabla S14. Matriz de cambio de uso del suelo para el periodo 2002 a 2006.

2002 a 2006	cultivos	bosque	palma	agua	infraestruc	sabana	suelo	total 2002	perdida	Cambio Neto	Intercambio	Cambio Total
cultivos	7,0389%	2,0713%	0,2678%	0,4723%	0,0284%	7,0503%	0,3925%	17,3216%	10,2827%	4,6568%	20,5654%	25,2222%
bosque	2,4040%	9,2020%	1,2732%	0,3671%	0,0034%	1,1505%	0,0261%	14,4263%	5,2243%	0,3325%	9,7834%	10,1160%
palma	0,4436%	1,2087%	0,5593%	0,0416%	0,0006%	0,0804%	0,0024%	2,3366%	1,7773%	0,1283%	3,2980%	3,4263%
agua	0,1905%	0,0876%	0,0083%	1,6084%	0,0053%	0,7440%	0,0125%	2,6566%	1,0482%	1,6332%	2,0965%	3,7297%
infraest	0,0331%	0,0049%	0,0004%	0,0072%	0,0068%	0,0887%	0,0103%	0,1514%	0,1446%	0,0486%	0,2892%	0,3378%
sabana	10,6036%	1,4713%	0,0960%	1,7253%	0,1073%	41,6397%	1,8841%	57,5273%	15,8876%	3,8412%	24,0928%	27,9340%
suelo	1,2646%	0,0479%	0,0032%	0,0679%	0,0483%	2,9325%	1,2158%	5,5802%	4,3644%	2,0365%	4,6557%	6,6922%
total 2006	21,9784%	14,0937%	2,2083%	4,2898%	0,2000%	53,6861%	3,5437%	100,0000%	38,7291%			
ganancia	14,9395%	4,8917%	1,6490%	2,6814%	0,1932%	12,0464%	2,3279%	38,7291%	61,2709%			

Matriz 2006 a 2010

Tabla S15. Matriz de cambio de uso del suelo para el periodo 2006 a 2010.

2006 a 2010	cultivos	bosque	palma	agua	infraestruc	sabana	suelo	total 2006	perdida	Cambio Neto	Intercambio	Cambio Total
cultivos	4,96%	2,70%	1,88%	0,64%	0,02%	11,65%	0,13%	21,98%	17,02%	7,50%	19,05%	26,54%
bosque	1,02%	8,26%	2,66%	0,23%	0,00%	1,91%	0,01%	14,09%	5,83%	0,20%	11,26%	11,46%
palma	0,14%	1,00%	0,92%	0,04%	0,00%	0,11%	0,00%	2,21%	1,29%	3,95%	2,58%	6,53%
agua	0,31%	0,31%	0,16%	1,68%	0,01%	1,81%	0,01%	4,29%	2,61%	0,48%	4,28%	4,75%
infraest	0,06%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,11%	0,01%	0,20%	0,19%	0,11%	0,16%	0,28%
sabana	7,39%	1,55%	0,53%	1,18%	0,05%	42,72%	0,27%	53,69%	10,97%	7,13%	21,94%	29,07%
suelo	0,60%	0,06%	0,01%	0,04%	0,01%	2,50%	0,33%	3,54%	3,22%	2,80%	0,84%	3,64%
total 2010	14,48%	13,89%	6,16%	3,81%	0,09%	60,82%	0,74%	100,00%	41,14%			
ganancia	9,52%	5,63%	5,24%	2,14%	0,08%	18,10%	0,42%	41,14%	58,86%			

Matriz 2010 a 2014

Tabla S16. Matriz de cambio de uso del suelo para el periodo 2010 a 2014.

2010 a 2014	cultivos	bosque	palma	agua	infraestruc	sabana	suelo	total 2010	perdida	Cambio Neto	Intercambio	Cambio Total
cultivos	4,12%	0,76%	0,52%	0,27%	0,06%	8,72%	0,03%	14,48%	10,36%	5,43%	20,72%	26,15%
bosque	3,26%	6,30%	1,84%	0,27%	0,00%	2,22%	0,01%	13,89%	7,59%	3,50%	8,20%	11,69%
palma	1,22%	1,95%	1,81%	0,15%	0,00%	1,04%	0,00%	6,16%	4,36%	1,36%	5,99%	7,35%
agua	0,37%	0,18%	0,12%	1,74%	0,02%	1,38%	0,00%	3,81%	2,08%	0,38%	4,15%	4,53%
infraest	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,05%	0,00%	0,09%	0,08%	0,13%	0,16%	0,29%
sabana	10,76%	1,20%	0,52%	1,77%	0,11%	46,19%	0,28%	60,82%	14,63%	0,79%	27,67%	28,46%
suelo	0,17%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,42%	0,13%	0,74%	0,61%	0,29%	0,65%	0,94%
total 2014	19,91%	10,40%	4,80%	4,20%	0,21%	60,03%	0,46%	100,00%	39,71%			
ganancia	15,79%	4,10%	2,99%	2,46%	0,21%	13,84%	0,32%	39,71%	60,29%			

Matriz 2014 a 2018

Tabla S17. Matriz de cambio de uso del suelo para el periodo 2014 a 2018.

2014 a 2018	cultivos	bosque	palma	agua	infraestruc	sabana	suelo	total 2014	perdida	Cambio Neto	Intercambio	Cambio Total
cultivos	6,45%	2,55%	0,30%	0,14%	0,41%	9,97%	0,09%	19,91%	13,47%	1,47%	26,93%	28,40%
bosque	2,97%	6,01%	0,56%	0,07%	0,00%	0,78%	0,00%	10,40%	4,39%	2,40%	8,77%	11,17%
palma	1,52%	2,17%	0,74%	0,03%	0,00%	0,33%	0,00%	4,80%	4,06%	2,88%	2,36%	5,23%
agua	0,62%	0,20%	0,03%	1,87%	0,01%	1,46%	0,00%	4,20%	2,32%	1,23%	2,19%	3,41%
infraest	0,02%	0,00%	0,00%	0,01%	0,07%	0,11%	0,00%	0,21%	0,15%	0,79%	0,30%	1,09%
sabana	9,79%	1,86%	0,29%	0,84%	0,50%	46,36%	0,39%	60,03%	13,66%	0,70%	25,92%	26,62%
suelo	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,30%	0,12%	0,46%	0,33%	0,16%	0,67%	0,82%
total 2018	21,38%	12,79%	1,92%	2,97%	1,00%	59,32%	0,61%	100,00%	38,38%			
ganancia	14,93%	6,78%	1,18%	1,09%	0,94%	12,96%	0,49%	38,38%	61,62%			

Matriz 2018 a 2022

Tabla S18. Matriz de cambio de uso del suelo para el periodo 2018 a 2022.

2018 a 2022	cultivos	bosque	palma	agua	infraestruc	sabana	suelo	año 2018	perdida	Cambio Neto	Intercambio	Cambio Total
cultivos	7,10%	3,71%	1,82%	0,31%	0,06%	8,30%	0,08%	21,38%	14,28%	3,98%	20,60%	24,58%
bosque	2,73%	6,75%	1,84%	0,08%	0,01%	1,38%	0,01%	12,79%	6,05%	0,10%	11,90%	11,99%
palma	0,38%	0,70%	0,69%	0,01%	0,00%	0,14%	0,00%	1,92%	1,23%	3,00%	2,46%	5,46%
agua	0,17%	0,09%	0,04%	1,71%	0,02%	0,91%	0,02%	2,97%	1,26%	0,36%	2,52%	2,88%
infraest	0,21%	0,01%	0,00%	0,01%	0,14%	0,57%	0,06%	1,00%	0,86%	0,41%	0,90%	1,31%
sabana	6,77%	1,43%	0,52%	1,20%	0,35%	48,10%	0,96%	59,32%	11,23%	0,45%	22,45%	22,90%
suelo	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,37%	0,18%	0,61%	0,43%	0,69%	0,86%	1,55%
año 2022	17,39%	12,69%	4,92%	3,33%	0,59%	59,77%	1,30%	100,00%	35,34%			
ganancia	10,30%	5,95%	4,23%	1,62%	0,45%	11,67%	1,12%	35,34%	64,66%			

Extensión total de cada uso del suelo

Tabla S19. Extensión total de cada uso del suelo en el área de estudio para cada periodo analizado.

	CULTIVOS Y PASTOS	BOSQUES	PALMA DE ACEITE	CUERPOS DE AGUA	INFRAESTRUCTURA	SABANAS	AFLORAMIENTOS ROCOSOS
2002	2.644.832,75	2.202.745,99	356.781,51	405.641,57	23.120,67	8.783.839,85	852.039,73
2006	3.355.909,55	2.152.078,04	337.211,35	655.031,13	30.546,56	8.197.360,17	541.108,14
2010	2.211.114,01	2.121.148,25	940.903,41	582.359,37	13.363,12	9.286.423,82	113.711,12
2014	3.040.552,10	1.587.345,74	732.839,34	640.546,21	32.686,53	9.165.405,47	69.617,44
2018	3.264.403,26	1.953.381,56	293.483,56	453.071,21	153.096,18	9.057.886,99	93.669,42
2022	2.655.992,99	1.938.236,27	751.275,82	508.205,01	90.219,18	9.126.063,85	199.022,63