

DINÂMICA ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS CAMBIOS DE COBERTURAS DE LA TIERRA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO CAUAMÉ (1988-2023), ESTADO DE RORAIMA, BRASIL

<https://doi.org/10.4215/rm2023.e22028>

Vera, J. J. M. ^{a*} - Tavares, S. S. ^b - Beserra Neta, L. C. ^c

(a) Maestrado en Sensores remotos.

ORCID: <http://orcid.org/0000-002-3248-8325>. **LATTES:** <https://lattes.cnpq.br/1524320128952480>.

(b) Maestrado en Sensores remotos.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7649-2994>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/0353581810615756>.

(c) Doctorado en geología y geoquímica.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-4895>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/3757993213874983>.

Article history:

Received 21 August, 2023
Accepted 21 October, 2023
Published 01 December, 2023

(*) CORRESPONDING AUTHOR

Address: Universidade Federal de Roraima, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. Av. Ene Garcez, 2413 Campus do Paricarana - Aeroporto - 69304-000 - Boa Vista, RR - Brasil - Telefone:(95) 36213162
E-mail: Jordanmarquina106@gmail.com

Resumen

El estudio de la dinámica espacio - temporal en cualquier lugar de la superficie terrestre es muy importante, permitiendo el seguimiento y evaluación de los impactos socioambientales generados por las actividades antrópicas. El objetivo de esta investigación fue evaluar la dinámica espacio - temporal de los cambios en las coberturas de la tierra para la Cuenca Hidrográfica del Río Cauamé, Roraima, Brasil, para los años 1988, 2003 y 2023, con técnicas de Geoprocésamiento en imágenes Landsat, estimando las áreas que fueron afectadas por las actividades humanas durante este periodo, analizando también los factores que están incidiendo en estos cambios. Como resultados obtuvimos la presencia de un fuerte proceso de cambios, especialmente las coberturas de sabanas, sustituidas por cultivos y construcciones. Las sabanas ocupaban para el año 1988 un 72,27 % de la superficie total, disminuyendo en 2023 en 60,47 % de la superficie total, con una pérdida de 37.556 ha., Finalmente, se afirma que los cambios en las coberturas, los procesos de deforestación y la amplia remoción de coberturas de sabanas, son producto de actividades antropogénicas, debido a la presión que la población está ejerciendo dentro y fuera del área de la cuenca.

Palabras-clave: Palabras-Claves: Geoprocésamiento; Sabanas de Roraima; Recursos Naturales; Clasificaciones Digitales; Fotointerpretación.

Resumo / Abstract

DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DAS MUDANÇAS DAS COBERTURAS DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAUAMÉ (1988-2023), ESTADO DE RORAIMA, BRASIL

O estudo da dinâmica espaço-temporal em qualquer ponto da superfície terrestre é muito importante, permitindo o monitoramento e avaliação dos impactos socioambientais gerados pelas atividades antrópicas. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a dinâmica espaço-temporal das mudanças na cobertura da terra para a Bacia Hidrográfica do Rio Cauamé, Roraima, Brasil, para os anos de 1988, 2003 e 2023, com técnicas de Geoprocessamento com imagens Landsat, estimando as áreas que foram afetadas por atividades antrópicas nesse período, analisando também os fatores que estão influenciando essas mudanças. Como resultados obtive a presença de um forte processo de mudança, principalmente as coberturas de savana, substituídas por cultivos e edificações. As savanas ocupavam 72,27% da área total em 1988, diminuindo em 2023 em 60,47% da área total, com uma perda de 37.556 ha. Finalmente, afirma-se que as mudanças na cobertura, os processos de desmatamento e a remoção extensiva da cobertura de savana são produto de atividades antrópicas, devido à pressão que a população está exercendo dentro e fora da área da bacia.

Palavras-chave: Geoprocessamento; Savannas de Roraima; Recursos naturais; Classificações Digitais; Fotointerpretação.

SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF LAND COVER CHANGES IN THE WATERSHED OF THE CAUAMÉ RIVER (1988-2023), RORAIMA STATE, BRAZIL

The study of spatial -temporal dynamics anywhere on the earth's surface is very important, allowing the monitoring and evaluation of the socio-environmental impacts generated by anthropic activities. The objective of this research was to evaluate the spatial-temporal dynamics of changes in land cover for the Watershed Cauame River, Roraima, Brazil, for the years 1988, 2003 and 2023, with Geoprocessing techniques in Landsat images, estimating the areas that were affected by human activities during this period, also analysing the factors that are influencing these changes. As results we obtained the presence of a strong change process, especially the savanna covers, replaced by crops and buildings. The savannas occupied 72.27% of the total area in 1988, decreasing in 2023 by 60.47% of the total area, with a loss of 37,556 ha. Finally, it is stated that the changes in the coverage, the deforestation processes and the extensive removal of savanna coverage are the product of anthropogenic activities, due to the pressure that the population is exerting inside and outside of the basin area.

Keywords: Geoprocessing; Roraima Savanna; Natural Resources; Digital Classifications; Photointerpretation.

INTRODUCCIÓN

Con las crecientes preocupaciones contemporáneas sobre el cambio climático, los problemas ambientales globales y la sostenibilidad ambiental, la ciencia del cambio de las coberturas de la tierra se ha convertido en una dirección científica única para abordar estos temas desafiantes (Gutman et al., 2004; RINDFUSS et al., 2004; TURNER et al., 2007; ZHU et al., 2022). El cambio de la cubierta terrestre es un fenómeno generalizado causado por el cambio climático en las últimas décadas, consecuencia del rápido crecimiento de la población y la industrialización acelerada (GOLDEWIJK et al., 2017). Entonces la ciencia del cambio de coberturas de la tierra, es definida como:

El campo interdisciplinario que busca comprender la dinámica de la cobertura y el uso de la tierra como un sistema humano-ambiental acoplado para abordar la teoría, los conceptos, los modelos y las aplicaciones relevantes para los problemas socioambientales, incluida la intersección de los dos, y tiene muchos componentes, en los que uno de los componentes fundamentales y críticos es la observación, el seguimiento y la caracterización del cambio de coberturas de la tierra (TURNER et al., 2007, p. 1).

La superficie terrestre, ha estado cambiando a un ritmo sin precedentes. Más de la mitad de la superficie terrestre libre de hielo, ha sido modificada por los humanos (ELLIS et al., 2010), y casi todas las superficies terrestres han sido influenciadas por el cambio climático y varios tipos de perturbaciones terrestres (DALE, 1997; POTTER et al., 2003; ZHU et al., 2022).

La teledetección, en particular la teledetección satelital, puede proporcionar mediciones sinópticas y repetidas de la superficie terrestre global a diferentes resoluciones espectrales, espaciales, radiométricas y temporales, siendo de gran importancia para estudiar el cambio global de la tierra (JUSTICE et al., 1998; ROY et al., 2014; SELLERS et al., 1995). En las últimas décadas, se han hecho grandes avances en el mapeo a gran escala de los cambios de la cobertura de la tierra, basados en datos de sensores remotos, debido a la creciente cantidad de satélites de observación de la tierra (BELWARD; SKØIEN, 2015; USTIN; MIDDLETON, 2021), sobre todo con la política de datos abiertos (WOODCOCK et al., 2008; WULDER et al., 2012; ZHU et al., 2019), con la disponibilidad de imágenes gratuitas de diferentes sensores satelitales.

Además, la información sobre cambios de la tierra ahora se puede monitorear casi en tiempo real (SHANG et al., 2022; TANG et al., 2020; VERBESSELT et al., 2012; XIN et al., 2013; YE et al., 2021), lo que mejora en gran medida su valor para los administradores de recursos y los encargados de formular políticas. También hemos sido testigos de una proliferación de algoritmos de clasificación del cambio de coberturas de la tierra (ZHU, 2017), que se centran principalmente en la información "desde-hasta", es decir, información sobre la cobertura de la tierra y/o el uso del suelo antes y después del cambio (HANSEN; LOVELAND, 2012; PRICOPE et al., 2019; YE et al., 2021). Cabe señalar que aunque la "cobertura de la tierra" (las propiedades físicas de la superficie de la Tierra) y el "uso del suelo" (la utilidad social, económica y cultural del suelo) son bastante distintos (TURNER, 1997), a menudo se agrupan en productos de teledetección, la "cobertura de la tierra" se usa generalmente como un sustituto para entender el "uso de la tierra", como la inclusión de tierras de cultivo y tierras urbanizadas en las categorías de cobertura de la tierra (ANDERSON et al., 1976). Teniendo en cuenta que los datos de teledetección proporcionan información sobre la cobertura de la tierra, en lugar de sobre el uso del suelo, a continuación, nos centraremos principalmente en los cambios de las coberturas de la tierra para esta investigación.

La Cuenca Hidrográfica del Rio Cauamé (CHRC) es considerada un importante territorio en función de sus múltiples usos, contribuyendo para el abastecimiento de agua en la Ciudad de Boa Vista, sus balnearios, la pesca y la captación de múltiples recursos para usos agrícolas y pecuarios (STRUKER et al., 2022).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la dinámica espacial y temporal de los cambios de coberturas de la tierra en la CHRC, del estado de Roraima, Brasil, con el uso de técnicas de Geoprocesamiento, para los años 1988, 2003 y 2023, cartografiando los cambios de coberturas de la tierra y calculando las áreas que fueron afectadas por las actividades humanas durante este periodo. Como también, se buscó analizar los factores que están incidiendo en estos cambios, como las deforestaciones y remociones de coberturas naturales, por coberturas antrópicas. De esta manera, se

buscó responder a la pregunta, si estos cambios de coberturas de la tierra y el incremento de las áreas intervenidas (deforestaciones, remoción y sustitución de cubierta original), son producto de las actividades humanas en la CHRC en los últimos 35 años, como consecuencia del crecimiento natural de la población y las actividades agrícolas. Teniendo como hipótesis, de que esas poblaciones aumentan la presión en todos los recursos naturales en la misma, con la consecuente degradación de los mismos, con sus frecuentes impactos ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio abarca la Cuenca Hidrográfica del Río Cauamé (CHRC), localizada al Nor-Este del Estado de Roraima, Brasil. Formando parte de dos importantes municipios: Alto Alegre y Boa Vista, dentro de las coordenadas UTM: 364.652,40 – 309.628,25 m. N y 765.590,45 – 681.146,52 m. E (Figura 1), con un área aproximada de 3.181,41 Km². El acceso al área de estudio se realiza por la carretera Manaus-Venezuela (BR-174), Boa Vista - Taiano (RR-342), Boa Vista - Alto Alegre (RR-205), como también existe vías locales que facilita el acceso al área de estudio.

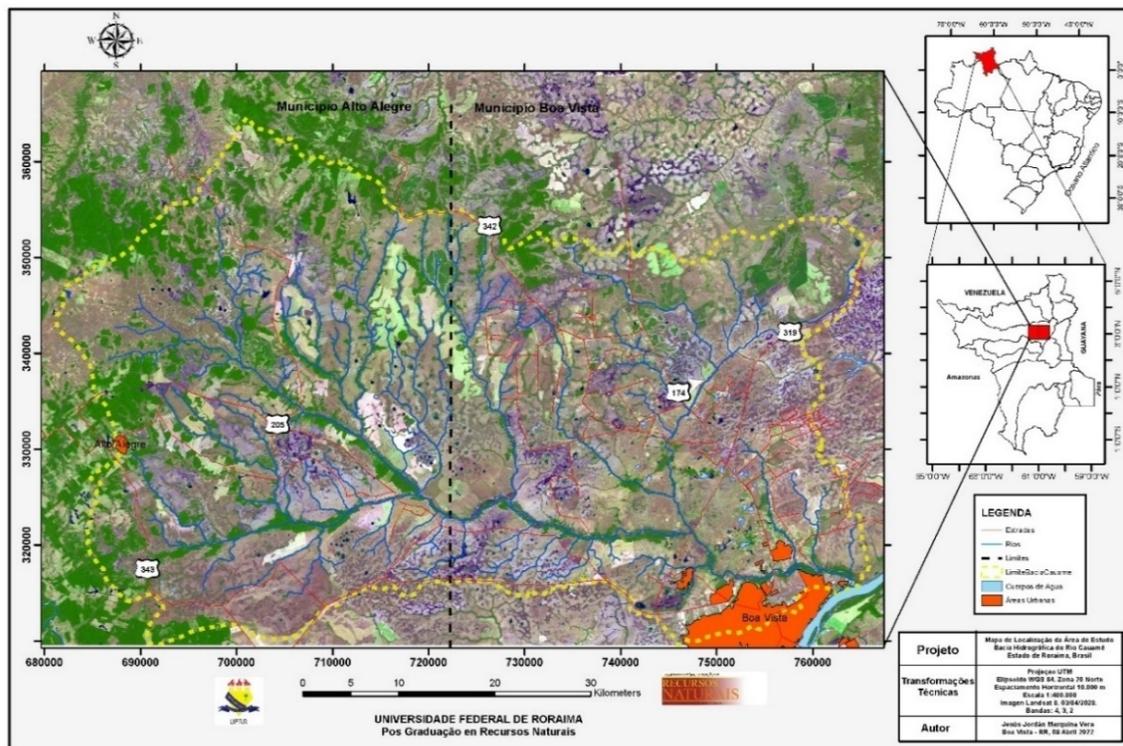


Figura 1- Mapa de localización geográfica de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauamé (CHRC), Estado de Roraima, Brasil

Características geográficas generales

La CHRC, en su mayoría está inmersa en la gran extensión de sabanas, también denominadas “*Campos del Rio Branco*” o *Lavrado*”, este último término es muy común entre los moradores locales, y fue introducido en la literatura por Luciano Pereira en 1917, siendo un término de uso popular en la región. Sin embargo, los términos *lavrado*, cerrado y sabanas, son comúnmente usados para identificar

el paisaje de vegetación abiertos localizados en las fronteras de Brasil, Guayana y Venezuela. El proceso de construcción de este paisaje, está relacionado directamente a eventos tectónicos, y pasadas fluctuaciones de erosión y clima en la región (BARBOSA et al., 2007). Encontrándose situada sobre rocas precámbricas mesozoicas y cenozoicas del Cratón Guayanés contenidas por rocas volcánicas e intermedias del Grupo *Surumu*, basaltos y andesitos de la formación *Apoteri*, rocas supracrustales del Grupo *Cauarane*, ortogénesis de la Suíte Metamórfica Río *Urubu* y sedimentos semi-consolidados de la Formación Boa Vista, en donde se encuentra la mayor parte del paisaje de sabanas, que es el resultado de un nivelamiento erosivo del Graven de *Takutu* con más de 2.000 m. de sedimentos derivados de la destrucción del remanente Grupo Roraima (COSTA et al., 2005).

En la CHRC, cuenta con varias unidades geomorfológicas a saber: *Patamar* de Interfluvio *Cauamé - Uraricoera*; Colinas y Morros de Alto y Medio *Cauamé*; Planicies y terrazas fluviales del Río *Cauamé*; Relieves Residuales y la Depresión de Boa Vista. Con un relieve en su mayoría de plano a suavemente ondulado, con procesos predominante de acumulación de sedimentos (REIS NETO, 2007; REIS-NETO; COSTA, 2010). El clima de Roraima es característico de Sabanas Awi (tropical húmedo sin estación fría) según la clasificación de Köppen, con una precipitación media 1.612 ± 400 mm, los meses secos van desde diciembre hasta marzo (BARBOSA et al., 2007), con un pico pluviométrico en junio, y un periodo lluvioso comprendido desde abril hasta septiembre (BARNI et al., 2020). Con una vegetación predominantemente de sabanas, pero también existen: Bosques densos lluviosos, Bosques semidecíduos estacionales, sabanas parques (con arbustales), sabanas limpias (predominio de gramíneas), como también existen áreas de construcciones, cultivos y plantaciones forestales (BARBOSA et al., 2007). La cuenca tiene también muchos recursos hídricos; con varios afluentes de agua, que alimentan el Río Cauamé, con un conjunto de lagunas en toda su extensión, las cuales surgieron cuando el pleni-plano posterior a la formación Boa Vista aplano esa área dejando algunas depresiones, donde innumerables lagunas, por lo general de forma circular ocuparon esas depresiones aisladas (SIMÕES-FILHO et al., 2010), aunado al grande acuífero subterráneo de Boa Vista, con una gran variedad del recurso fauna que no ha sido catalogada y estudiada en su totalidad.

Delimitación del área de estudio

El área de la cuenca fue delimitada usando cuatro imágenes del sensor *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de la NASA, descargadas del sitio web: <http://earthexplorer.usgs.gov>, el cual contiene información del Modelo Digital de Elevación (MDE), con resolución espacial de 30 m., luego se generó un mosaico de las imágenes con el software QGis versión 3.28.5, siendo proyectadas a un sistema de coordenada WGS 84 UTM Zona 20 Norte. Posteriormente, se realizó una capa de pisos altitudinales con 20 rangos, delimitándose el área de la cuenca aplicando interpretación visual, con la ayuda de la capa de niveles altitudinales, las curvas de nivel y de fondo la imagen de *Google Earth* para obtener una mayor precisión. Terminado el polígono de la cuenca se procedió a calcular con el SIG el área total de la cuenca, siendo unos 3.181,41 Km² o sea 318.141 hectáreas (ha.), (Figura 2).

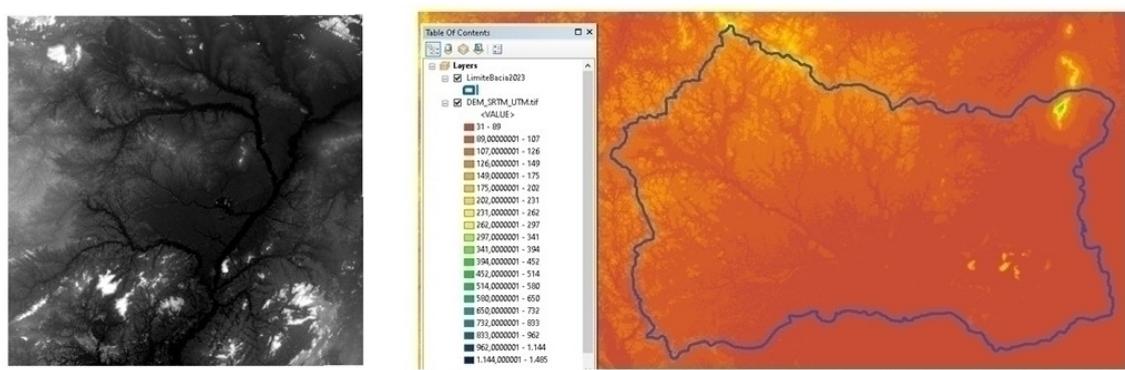


Figura 2 -Ejemplo de mosaico y la imagen clasificada (Natural Break Method)

Para hacer el análisis espacio-temporal de esta cuenca, fue necesario una serie de procedimientos técnicos, descritos a continuación:

Selección de las imágenes multiespectrales

Fueron descargadas imágenes del sensor Landsat 5, para el año 1988; para el año 2003 una imagen del sensor Landsat 7, y para el año 2023 una imagen del sensor Landsat 9, en conjunto con las imágenes del servicio de *Google Earth 2023*. Las imágenes Landsat fueron adquiridas del servidor de la NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov>), y sus características principales se muestran en el Tabla 1.

Datos Espaciales (Sensor)	Fecha de Adquisición	Resolución Espacial	Resolución Radiométrica	Resolución Espectral	Nivel de Corrección	% de nubosidad de la escena
Landsat 5	1988/03/31	30 x 30 m.	8 bits	7 bandas	L1	2,00 %
Landsat 7	2003/01/28	30 x 30 m.	8 bits	8 bandas	L1	1,00 %
Landsat 9	2022/09/29	30 x 30 m.	16 bits	11 bandas	L1	8,64 %

Tabla 1 – Principales características del sensor Landsat (5,7 y 9)

Fuente: <http://www.earthexplorer.com>.

Preprocesamiento de las imágenes

Con el uso del software QGIS versión 3.28.5 (*Firenze*) se realizó la corrección atmosférica de las imágenes Landsat, aplicando el Método de Sustracción de Objetos Oscuros (DOS-1) propuesto por Chávez (1988), como también se realizó la transformación de radiancia a reflectancia con el complemento de Clasificación Semiautomática (*Semi-automatic classification plugin*) elaborado por Lucas Congedo (2021) para el software QGIS.

Trabajo de Campo

Para esta etapa se realizó la salida de campo a fin de identificar las diferentes coberturas, levantando un total de 17 puntos de control, usando GPS navegador (Garmin C62x), capturando imágenes verticales y horizontales con el uso de Dron y cámara semiprofesional digital SONY de 18x de zoom. En la Figura 3, se pueden observar algunos ejemplos de puntos de control tomados en campo.

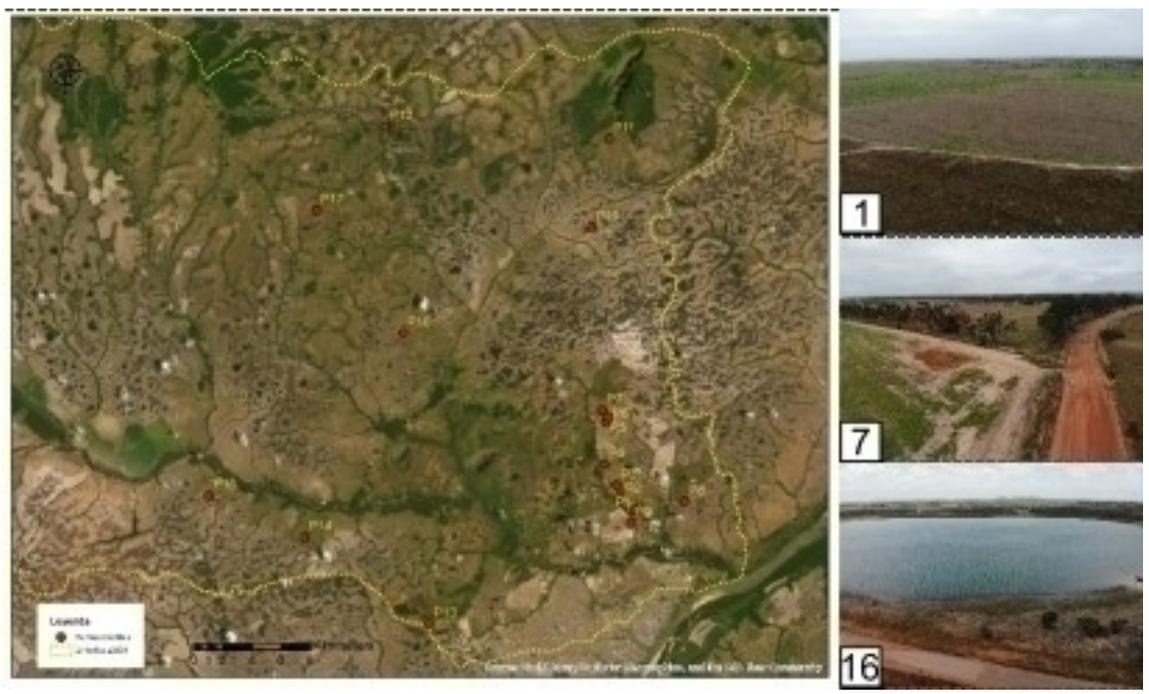


Figura 3. Puntos de control y algunas fotos en campo.

Punto 1: Ejemplo de Cultivos circulares.

Punto 7: Carreteras de Tierra e remoción de coberturas de sabanas al fondo.

Punto 16: Laguna Azul.

Post – procesamiento de las imágenes

En esta etapa se elaboró el acoplamiento de las imágenes (*Layer Stack*), para crear las imágenes en falso color. Seleccionándose las bandas que mejor representan las coberturas vegetales, siendo las bandas 4 (infrarrojo cercano), banda 3 (rojo) y la banda 2 (verde), esto para las imágenes Landsat 5 y 7 (MELO, 2005), mientras que para la imagen del Landsat 9 se seleccionaron las bandas 6 (infrarrojo cercano), 5 (rojo) y 4 (verde), respectivamente, y que posteriormente se realizó el corte de cada una de las imágenes con el límite vectorial de la cuenca.

Seguidamente, se aplicó la técnica de segmentación de las imágenes Landsat (*Segment Mean Shift Function*) (FUKUNAGA; HOSTETLER, 1975; ESRI, 2023), que agrupa un conjunto de píxeles adyacentes que tienen características espectrales similares en segmentos continuos, estableciéndose el nivel de importancia otorgado a las diferencias espectrales de la imagen, aquí se le dio un valor de 18, por cuanto el método establece un rango que oscila entre 10 y 20. Un valor alto es apropiado cuando se tiene categorías (coberturas) que se desean clasificar por separado, pero tienen características espectrales algo similares. Los valores más pequeños crean salidas espectralmente más suaves. Por ejemplo, con mayor detalle espectral en una escena boscosa, podrá tener una mayor discriminación entre las diferentes especies de árboles. En este trabajo se creó una nueva imagen ráster con 123 valores (categorías). Con muy buen agrupamiento espectral de las categorías (Figura 4).

DINÁMICA ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS CAMBIOS DE COBERTURAS DE LA TIERRA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO CAUAMÉ (1988-2023), ESTADO DE RORAIMA, BRASIL



Figura 4 - Ejemplo de la imagen creada con el Método Segment Mean Shift.

Posteriormente a cada una de estos 123 segmentos espectrales, se aplicó el método de clasificación supervisada de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood Classification*) de cada una de las categorías deseadas para los mapas de coberturas de la tierra, según la clasificación de coberturas propuestas por el IBGE (2012) (Figura 5).

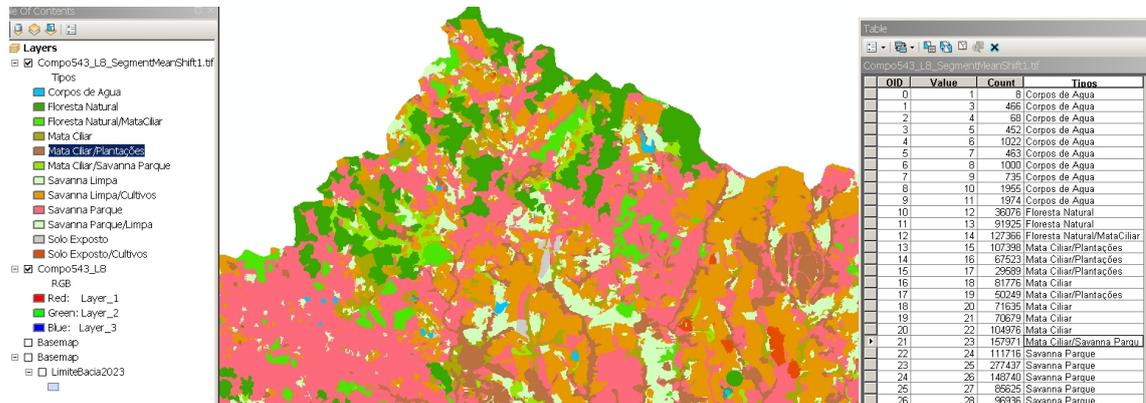


Figura 5 - Salida clasificada según el método de máxima verosimilitud

Es de notar que en algunos grupos no se logró separar espectralmente algunas categorías, por presentar respuestas espectrales muy similares. Dentro del número de categorías con segmentos más confusos tenemos: Sabanas Limpas con Cultivo (27), Suelos Expuesto con Cultivos (5) y Mata Ciliar con Plantaciones (4), como se muestra en la Tabla 2.

Clases	N de Segmentos	N pixeles
Bosque semidecidual/Mata Ciliar	1	127366
Mata Ciliar/Sabana Parque	1	157971
Floresta Natural	2	128001
Sabana Parque/Limpia	2	279996
Mata Ciliar	4	329066
Mata Ciliar/Plantaciones Forestales	4	254759
Sabana Limpia	5	303977
Suelo Expuesto/Cultivos	5	19502
Sabana Parque	7	938088
Cuerpos de agua	10	8143
Sabana Limpia/Cultivos	27	954264
Suelo Expuesto	55	44777
Total	123	3545910
Segmentos Confusos	40	32,5
Segmentos Ciertos	83	67,5

Tabla 2 - Clases, número de segmentos y pixeles generados posterior a la Clasificación Digital

Proceso de Edición de Vectores

Para alcanzar una mayor precisión en las coberturas de la tierra, se procedió a la vectorización del ráster con la herramienta para conversión de modelos ráster a modelos vectoriales (*Raster to Poligons*) donde se buscaron cuidadosamente las áreas (segmentos) que presentaban confusión, ajustándose visual y manualmente estos polígonos, apoyándonos con la imagen del Landsat 9 (2023) y las imágenes de *Google Satélite* 2023 (24/01/2023), alcanzando una precisión de cerca del 100% en la clasificación de las categorías (Figura 6). Para los años anteriores 2003 y 1988, se realizó el mismo procedimiento, de fotointerpretación visual con las imágenes Landsat 7 y 5 (Composición Falso Color Bandas 4,3,2, y aplicando realces espectrales), hasta lograr obtener los resultados deseados, en las coberturas para estos dos años.

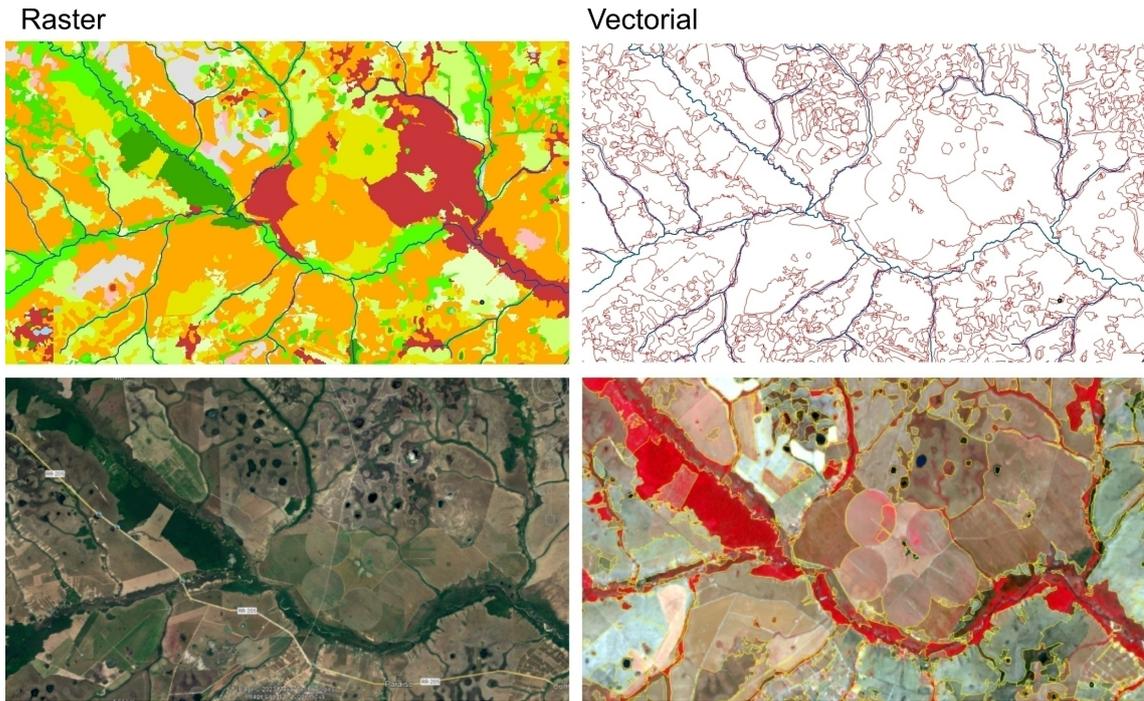


Figura 6 - Ejemplo de Edición vectorial, segmentación, vectorización e interpretación

Luego de corregir manualmente todos los polígonos confusos para cada capa vectorial y para cada año de estudio, se procede a realizar la técnica de suavizado de vectores (*Smooth Polygons/Bezier Interpolation Algorithm*), para eliminar esos efectos sinuosos producto de la vectorización de los píxeles, el mismo procedimiento se realizó para los años anteriores, como también se vectorizó visualmente las redes viales para cada año en cuestión.

Cálculo de las áreas

Se agruparon los polígonos según sus categorías o coberturas de la tierra con el uso del SIG (*Merge Tool*), calculándose sus respectivas áreas en hectáreas (*Calculate Geometry*). Como también se calculó las longitudes de las redes viales en Kilómetros para cada año de estudio, posteriormente fue exportada en formato txt, para su organización y presentación gráfica con el software *Microsoft Excel*, para su correspondiente análisis.

Salidas Cartográficas

La información levantada para los mapas de coberturas de la tierra, fueron hechas con imágenes de satélites de los sensores de la serie Landsat (5,7 y 9), las cuales tienen una resolución espacial en sus bandas multiespectrales de 30 m., permitiendo salidas cartográficas a nivel de reconocimiento, con una escala máxima de impresión de 1:50.000, pero con el uso de imágenes de *Google Earth Satellite*, se logró mejorar el detalle en la escala de levantamiento, permitiendo salidas cartográficas a 1:10.000, con precisiones planimétricas de hasta 5 m. en las capas (*Shapefiles*) originales de este trabajo (MARQUINA; MOGOLLÓN, 2018).

RESULTADOS

Los procesos de cambios y distribución espacial de las coberturas de la tierra fueron intensos estos últimos 35 años (1988 – 2023) en la cuenca, con una serie de modificaciones producto de las actividades humanas (Cultivos, Plantaciones Forestales, Pecuaria, Vialidades y Construcciones), tales como: deforestaciones de Bosques semidecíduos, Mata Ciliares y coberturas de Sabanas en general, procesos

distribuidos en toda la cuenca.

Siendo esta dinámica espacio-temporal explicada a continuación: En 1988, se observaron ciertas modificaciones de las coberturas de la tierra producto de las actividades humanas, tales como: áreas de cultivos, amplias áreas de Pastizales Implantados de la actividad de ganadería extensiva para la fecha y un área menor de construcciones del plano urbano de la ciudad de Boa Vista (Figura 7).

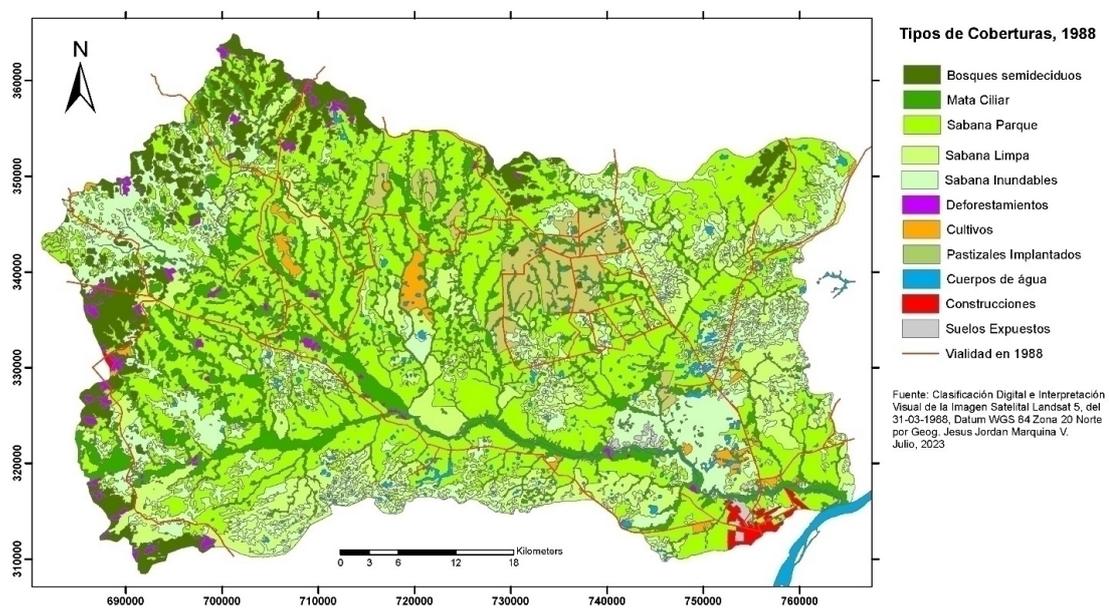


Figura 7 - Mapa de Coberturas de la Tierra de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauamé, 1988.

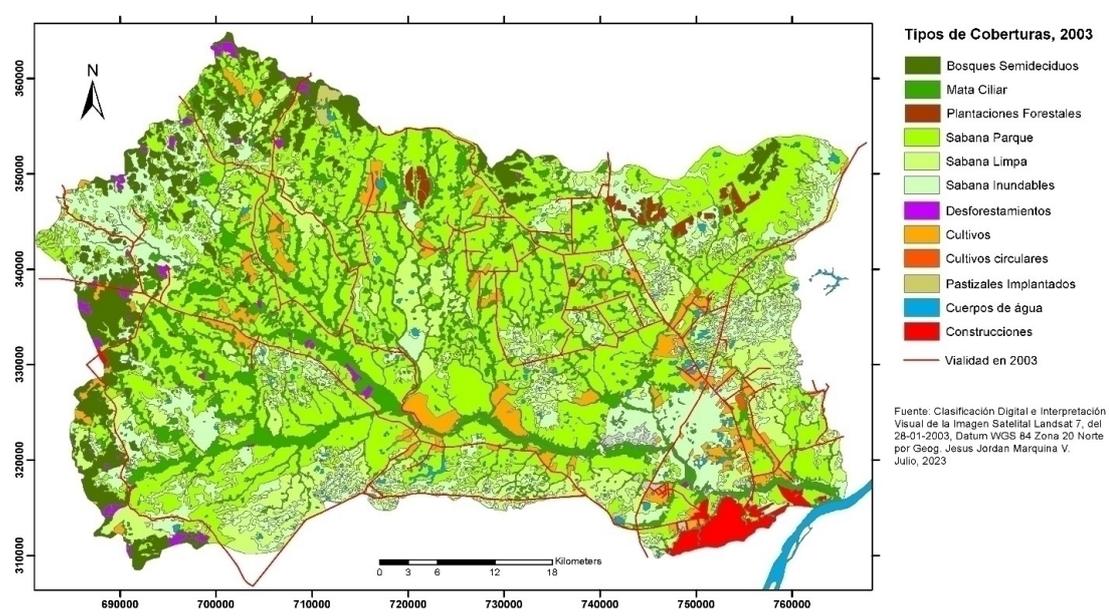


Figura 8 - Mapa de Coberturas de la Tierra de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauamé, 2003.

Ya para el 2003, aparecen dos nuevas coberturas, que no existían en 1988 (Figura 8), tales como las Plantaciones Forestales y los cultivos circulares de soja, que requieren de una alta inversión y tecnificación, como también se observó el incremento del plano urbano de la ciudad de Boa Vista y una mayor densificación de la vialidad (asfaltadas y de tierra), pasando de 512 Km en 1988, para 655 Km en

2003. Ya para el 2023, se observó una intensificación de los cambios en las coberturas de la tierra (Figura 9), aumentado las áreas de cultivos, las áreas de construcciones por la expansión urbana de la ciudad, con nuevos barrios periféricos y comunidades rurales, como también la densificación de la vialidad, pasando a 655 Km en 2003, densificándose en 2023 con unos 1.056 Km de vías (entre asfaltadas y de tierra). Siendo importante resaltar que para este año se reportaron varios incendios forestales como también la quema de amplias áreas de sabanas.

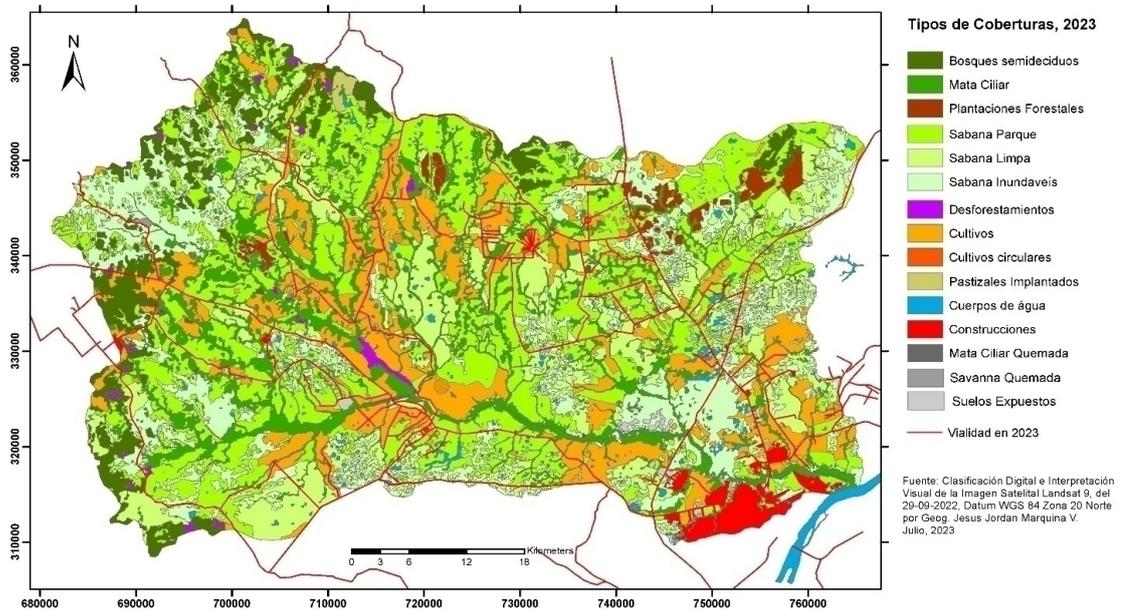


Figura 9 - Mapa de Coberturas de la Tierra de la Cuenca Hidrográfica del Río Cauamé, 2023

En la Tabla 3, están presentes los resultados de las coberturas de la tierra de la CHRC, referente al periodo 1988 al 2023, para las clases: Bosques semidecíduos estacionales, Mata Ciliar (Bosques de Galería), Sabanas mixtas (que incluye: Sabanas parques, Sabanas limpias y Sabanas inundables), Cultivos, Plantaciones forestales, Suelos descubiertos, Construcciones y Cuerpos de agua.

Coberturas de la Tierra	Año 1988		Año 2003		Año 2023	
	ha.	%	ha.	%	ha.	%
Bosques Semidecíduos	20.163	6,34	20.408	6,41	19.639	6,17
Mata Ciliar	43.701	13,74	42.095	13,23	40.931	12,87
Plantaciones Forestales	0	0,00	2.079	0,65	4.202	1,32
Sábanas Mixtas	229.925	72,27	228.663	71,87	192.369	60,47
Pastizales implantados	10.849	3,41	544	0,17	705	0,22
Desforestamientos	3.168	1,00	2.277	0,72	1.955	0,61
Cultivos	3.781	1,19	13.020	4,09	47.203	14,84
Cultivos circulares	0	0,00	176	0,06	279	0,09
Suelos Descubiertos	1.209	0,38	1.073	0,34	1.491	0,47
Construcciones	1.532	0,48	3.906	1,23	5.323	1,67
Cuerpos de Agua	3.813	1,20	3.900	1,23	4.044	1,27
Total de la Cuenca	318.141	100,00	318.141	100,00	318.141	100

Tabla 3- Clases de cobertura de la tierra, para los años 1988, 2003 y 2023, en Hectáreas y %, para la Cuenca Hidrográfica del Río Cauamé (CHRC).

Los cambios de coberturas de la tierra en los últimos 35 años (1988 - 2023) han sido muy dinámicos, apreciándose la disminución progresiva de las coberturas naturales originales (Figura 10), tales como: Matas Ciliares, que para 1988 tenía una superficie de 43.701 ha., pasando en el 2023 a 40.931 ha., perdiendo una superficie de 2.770 ha. En cuanto a los Bosques semidecíduos tuvo una pequeña recuperación, pasando de 20.163 en 1988, para 20.408 ha. en 2003, volviendo a disminuir en el 2023 con 19.639 ha.

Otra de las coberturas que han perdido mucha superficie en estos últimos 35 años, son las sábanas (parques, limpias e inundables), puesto que su superficie ha disminuido progresivamente por la implementación de cultivos principalmente y las construcciones en segundo plano, donde las coberturas de sábanas en el año 1988, contaban con un 72,27 % de la superficie total de la cuenca, disminuyendo en el 2023 a un 60,47 %, perdiendo una superficie de 37.556 ha.

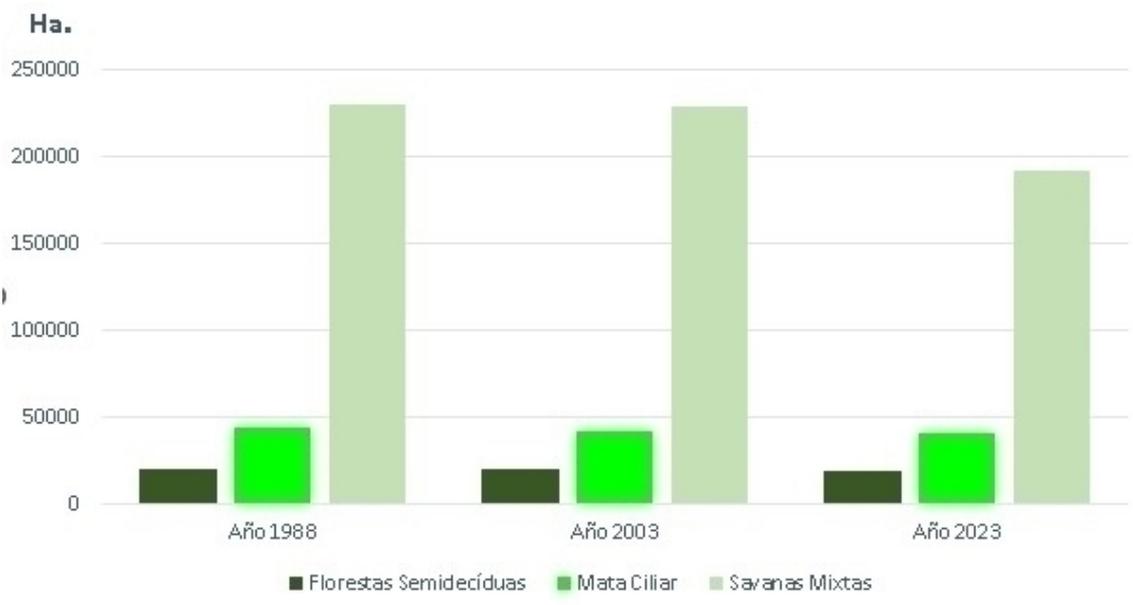


Figura 10 - Evolución de las coberturas naturales de la CHRC (1988 – 2023)

Una de las coberturas que ha incrementado exponencialmente su superficie producto de las acciones humanas, son los cultivos, donde en 1988 contaba con una superficie de 3.781 ha. (1,19 %), pasando a 13.020 ha. (4,09 %), en el 2003, y ya para el 2023, tiene una superficie total de 47.203 ha., con un 14,84 % de superficie de la cuenca. Esto sin anexar las superficies ocupadas por los cultivos circulares, siendo una actividad relativamente reciente (con altos recursos técnicos), donde en el 2003, contaba con 176 ha., y que para el año 2023, tiene una superficie de 279 ha, siendo la soja el principal cultivo.

Es importante destacar la presencia de Plantaciones Forestales, que en los últimos 24 años ha ganado importancia en la región, con especies de Acacia (*Acacia Mangium Willd*), como fuente de combustible maderero para las plantas eléctricas, suministrando energía a la ciudad de Boa Vista. Donde en 2003 se estimó una superficie de 2.079 ha. de Acacias, aumentando para el 2023 en 4.202 ha., más del doble de la superficie del año 2003.

Otra de las coberturas que han incrementado exponencialmente su tamaño, son las construcciones, con el avance de la mancha urbana de la ciudad de Boa Vista con nuevos barrios periféricos, tales como: *Cidade Satelite, Nova Cidade, Pedra Pintada, João de Barro*, entre otras comunidades de poblamiento reciente distribuidas de la cuenca, por lo general comunidades indígenas. En donde, para 1988 tenía una superficie de 1.532 ha., pasando a 3.906 ha., para el año 2003, y ya para el 2023 cuenta con una superficie de 5.323 ha., de construcciones dentro de los límites de la cuenca (Figura 11).

DINÁMICA ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS CAMBIOS DE COBERTURAS DE LA TIERRA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO CAUAMÉ (1988-2023), ESTADO DE RORAIMA, BRASIL

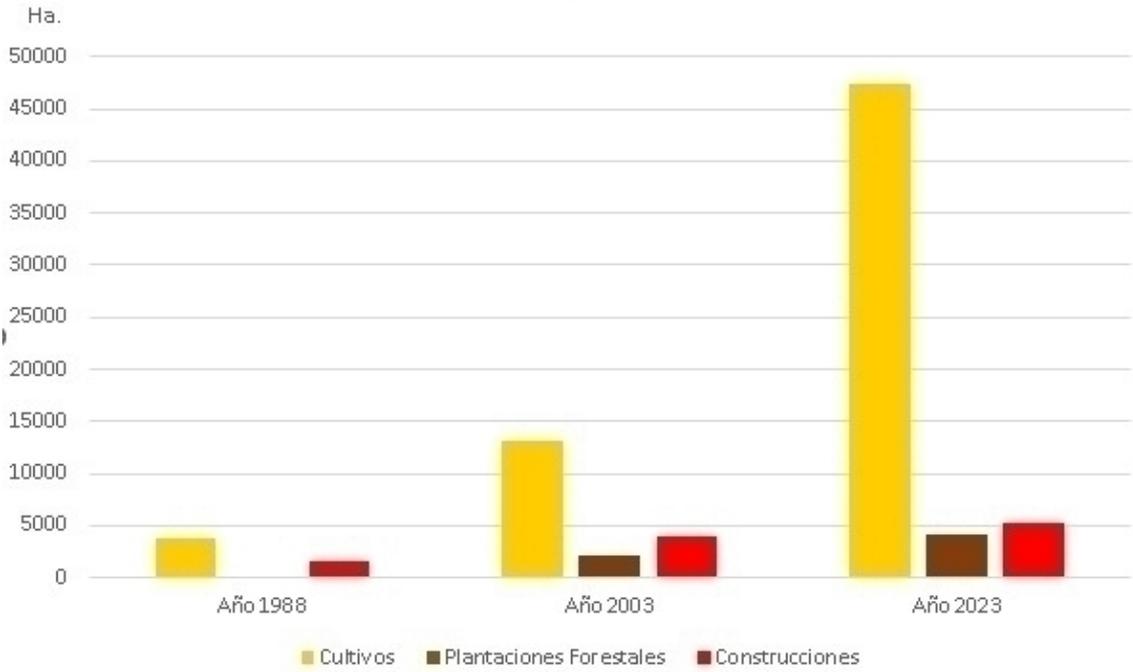


Figura 11 - Evolución de algunas de las coberturas de la tierra artificializadas en la CHRC (1988 – 2023)

Otras coberturas que han cambiado producto de las acciones humanas en este periodo son los pastizales implantados, donde en 1988 ocupaba una superficie de 10.849 ha., disminuyendo progresivamente hasta el 2023 para 705 ha., siendo sustituidas por cultivos principalmente. Los cuerpos de agua también han aumentado en superficie progresivamente pasando de 3.813 ha. en 1988, luego 3.900 ha., en 2003 y finalmente con 4.044 ha., en 2023, fenómeno particular producto del represamiento de nacientes de agua en la construcción de embalses artificiales para sistemas de riego en los cultivos.

DISCUSIONES

Una de las principales ventajas de hacer estudios multitemporales con sensores remotos, fue poder observar las dinámicas espacio – temporales de las coberturas de la tierra y verificar así los procesos de deforestación e intervención humana en la CHRC, desde el año 1988 hasta el 2023. Por lo tanto, la cuenca paso por un proceso de transformaciones, con un área en su mayoría de cobertura natural (93,92 %) en el año 1988, reduciendo su superficie natural en un 81,25 % en el año 2023, cuestión que ha sido advertida por la FAO (2020), donde indica que en las últimas décadas se está presenciando una fuerte intervención humana en todos los espacios naturales a nivel mundial, cuestión que realmente es preocupante.

En relación a la metodología aplicada, es importante destacar que para estimar las coberturas de la tierra para cada año el margen de error no fue significativo, puesto que se aplicó técnicas de clasificación digital en las imágenes, con una posterior interpretación visual detallada para todas y cada una de las mismas, apoyándonos con el uso de las imágenes Landsat (5, 7 y 9) previamente corregidas y en composición de falso color, como también con el uso de imágenes temporales de alta resolución espacial de *Google Earth Satellite*, se ha logrado alcanzar una alta fidelidad en la interpretación, generando una cartografía de alta precisión. Esto no significa que no existan otros métodos con igual o mejor precisión para la realización de levantamientos de coberturas de la tierra que pueden ser usados para tal fin (LILLESAND et al, 2007). También, los levantamientos en campo nos permitieron determinar con mayor precisión la hipótesis que habíamos planteado en el inicio de la investigación, donde efectivamente el proceso de deforestación y cambios de coberturas de la tierra son ampliamente influenciados por la expansión urbana y por ende al crecimiento de la población, ejerciendo una fuerte

presión sobre los recursos naturales de la cuenca, cuestión que responde a la pregunta inicialmente formulada.

Por lo tanto, el problema de cambios de usos de la tierra y degradación de recursos naturales causa grandes conflictos socioambientales, no solo en la CHRC, sino también en todo el mundo, ya que los paisajes naturales están siendo fuertemente intervenidas por las poblaciones en búsqueda de tierras y recursos forestales, situación que genera preocupación, puesto que cuando estos problemas ocurren es muy difícil su recuperación, y de acuerdo, con la evaluación de recursos forestales globales de la FAO (2020) se estimó que existe 726 millones de hectáreas de bosques en las áreas protegidas en todo el mundo, y que entre 1990 y 2020 fueron perdidas 420 millones de hectáreas de bosques debido a las deforestaciones, sin contar con áreas de sabanas naturales sustituidas por cultivos y pastos para la ganadería.

No obstante, con las investigaciones realizadas en campo se logró confirmar el estado actual de las diferentes coberturas, cuestión que no es nada satisfactorio (impactos negativos), pues tanto: coberturas de Bosques Semidecíduos, Mata Ciliar y Sabanas en general, están siendo taladas, quemadas o removidas para la implementación de diferentes usos agro-económicos, tanto por las poblaciones locales o por empresas agro-industriales dentro de la cuenca. Por otra parte, se logró identificar impactos positivos, con la introducción de Plantaciones Forestales, iniciando realmente en 1999 por la empresa *Ouro Verde Agrosilvopastoril Ltda.* (SOUZA, 2014), incrementado su cobertura en los últimos años, donde los bosques plantados brindan servicios ecosistémicos importantes y representan recursos globales valiosos, como el secuestro de carbono y productos madereros (WINGFIELD et al., 2015; CHEN et al., 2019; FAO, 2020; WANG et al., 2022) apoyando el desarrollo desde el punto de vista económico regional (HANEWINKEL et al., 2013; WINGFIELD et al., 2015; HARRIS et al., 2021; WANG et al., 2022), como fuente de energía eléctrica para la ciudad de Boa Vista.

Por lo tanto, es importante continuar haciendo un seguimiento continuo de las dinámicas espacio – temporales de las coberturas de la tierra en la cuenca, apoyándose en técnicas de Geoprocesamiento, quedando de parte de los organismos gubernamentales los respectivos correctivos, en cuanto a la regulación y controles de nuevos usos de la tierra, en estos frágiles ecosistemas.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en esta investigación, podemos afirmar que los cambios en las coberturas de la tierra, los procesos de deforestación y la amplia remoción de coberturas de sabanas, son producto de las actividades antropogénicas, debido a la presión que la población está ejerciendo dentro y fuera de la CHRC. Esta presión es también ejercida por el acelerado crecimiento de la urbanización en constante expansión, motivada por la instalación de actividades turísticas y agroindustriales.

De esta manera, existe una fuerte presión sobre los recursos naturales de la CHRC, y si no se toman medidas en un periodo corto de tiempo se estarían generando toda una serie de problemas en las próximas décadas, tales como: la pérdida de biodiversidad, contaminación de fuentes hídricas, degradación de suelos y muchos otros problemas de carácter socioambiental, siendo importante realizar un Plan de Ordenamiento Territorial o Ambiental, con su respectiva regularización y reglamentación en los usos de la tierra, a un nivel y escala de levantamiento detallado para esta importante cuenca.

AGRADECIMIENTOS

De manera muy especial a la Organización de Estados Americanos (OEA) y al Grupo de Cooperación Internacional de Universidades Brasileñas (GCUB) (Programa PAEC), por haberme otorgado el beneficio de Becario Académico. También un especial agradecimiento a la Universidad Federal de Roraima (UFRR), en su Programa de Pos-graduación en Ciencias Ambientales (Recursos Naturales) (PRONAT), por haber brindado el apoyo institucional para llevar a cabo este valioso trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, J.R., *et al.* A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. Government printing office (US geological survey. Professional Paper 964), Washington, DC, v. 1, n.1, p 1-34, 1976. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/pp964>. Acesso em: 10 Jul. 2023.
- BARBOSA, R. I., *et al.* The “Lavrados” of Roraima: Biodiversity and Conservation of Brazil Amazonian Savannas. In: Global Science Books. **Functional Ecosystem and Communities.**, v.1, n.1, p. 29-41, 2007.
- BARNI, P. E., *et al.* Precipitação no extremo norte da Amazônia: distribuição espacial no estado de Roraima, Brasil. **Revista Sociedade e Natureza.** Uberlândia, v.32, n.1, p 439 – 456, 2020.
- BELWARD, A.S.; SKØIEN, J.O. Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. **ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.** 103, 115–128, 2015.
- CHAVEZ, P. J. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. **REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT.** New York U.S, v. 24, n. 1, p. 459-479, 1988.
- CHEN, T. *et al.* China and India lead in greening of the world through land-use management. **Nature Sustainability**, London-New York, v.2, n.1, p. 122-129, 2019.
- CONGEDO, L. Complemento de clasificación semiautomática: una herramienta de Python para la descarga y el procesamiento de imágenes de detección remota en QGIS. **Revista de software de código abierto**, v. 6, n. 64, 2021.
- COSTA, J.A.V.; SCHAEFER, C. E.; VALE JÚNIOR, J.F. Aspectos geológicos geomorfológicos do Estado de Roraima. **Revista Ação Ambiental**, Viçosa, n. 32, p. 11-14, 2005.
- DALE, V.H. The relationship between land-use change and climate change. **Ecology Application**, v. 7, n. 1, p. 753–769, 1997.
- ELLIS, E.C. *et al.*, 2010. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. **Global Ecology Biogeography**, v. 19, p. 589–606, 2010.
- ESRI (2023). Environmental Systems Research Institute, Inc. https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/segment-mean-shift-function.htm#ESRI_SECTION1_833311C0BD9A4231B4105F8888ECDDE1
- FAO. **Global Forest Resources Assessment**, Roma-Itália: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2020. 190 p.
- FUKUNAGA, E.; HOSTETLER, L. The Estimation of the Gradient of a Density Function, with Applications in Pattern – Recognition. **IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY**, v. 21, n.1. p. 32 - 40, 1975.
- GOLDEWIJK, K. K. *et al.* Anthropogenic land use estimates for the Holocene–HYDE 3.2. **Earth Syst Sci**, v. 9, n. 1, p. 927–953, 2017.
- GUTMAN, G. *et al.* (Ed.). **Land change science: observing, monitoring and understanding trajectories of change on the earth’s surface.** Springer Science & Business Media, 2004.
- HANEWINKEI, M. *etal.* Climate change may cause several loss in the economic value of European forest. **Nature Climatic Change**, London, v.3, n. 3, p. 203-207, 2013.
- HANSEN, M.C.; LOVELAND, T.R., 2012. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. **Remote Sens. Environment**, v. 122, p. 66–74, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024>. Acesso em: 10 Jul. 2023.
- HARRIS, N. L. *et al.* Global maps of twenty – first century forest carbon fluxes. **Nature Climatic Change**, London, v.11, n.1, p. 234-240, 2021.
- IBGE. **Manual Técnico de Vegetação Brasileira.** 1 ed. Rio de Janeiro: IBGE. 2012. 271 p.

- JUSTICE, C.O., *et al.* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Trans. Geoscience of Remote Sensing*, v. 36, p. 1228–1249, 1998.
- LILLESAND, T.; KIEFER, R.; CHIPMAM, J. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons. 2015. 770 p.
- MARQUINA, J; MOGOLLÓN, A. Niveles y escalas de levantamiento de información geográfica en sensores remotos. *Revista Geográfica Venezolana*. Mérida, v.50, n.1, p. 42 – 52, 2018.
- MELO, L.H. **Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra**. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2005, 156 p.
- POTTER, C. *et al.* Major disturbance events in terrestrial ecosystems detected using global satellite data sets. *Global Change Biology*, v. 9, p. 1005–1021, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00648.x>. Acesso em: 5 jul. 2023.
- PRICOPE, N.G., MAPES, K.L., WOODWARD, K.D. Remote sensing of human–environment interactions in global change research: a review of advances, challenges and future directions. *Remote Sensing*, v.11. n. 23, p. 2783, 2019.
- REIS NETO, R. A.; COSTA, J. A. MAPEAMENTO DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DA BACIA DO RIO CAUAMÉ – RR. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Curitiba-Paraná. v. 11, nº 2, p. 1 – 8, 2010.
- REIS NETO, Rainmundo Alves. **Geomorfologia e neotectônica da Bacia Hidrográfica do Rio Cauamé**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) – Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2007.
- RINDFUSS, R.R. *et al.* Developing a science of land change: challenges and methodological issues. *Proceeding of Natural Academy of Science.*, v.101, n, 1, p. 13976–13981, 2004.
- ROY, D.P., *et al.* Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, v.145, p. 154–172, 2014.
- SELLERS, P.J. *et al.* Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models—algorithms—experiments. *Remote Sensing of Environment*. 51, 3–26, 1995.
- SHANG, R., 2022. Near-real-time monitoring of land disturbance with harmonized Landsats 7–8 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, v. 278, n. 1, p. 1 -15, 2022.
- SIMÕES-FILHO, F.L; TURCQ, B; SIFEDDINE, A. Mudanças paleoambientais do contato Floresta-Savana de Roraima durante o Holoceno. En: BARBOSA, R. I.; MELO, V. F. (org). **Roraima: homem, ambiente e ecologia**. Boa Vista: FEMACT, 2010. p. 1-170.
- STRUKER, D.; BESERRA, L. C. N.; TAVAREZ. E. S. J. Compartimentação da paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Cauamé, RR: uma análise da fragilidade á erosão do solo. En: WANKLER, F. *et al* (Org.). *A Bacia Hidrográfica do Rio Cauamé*. Boa Vista: ProfÁgua/UFRR. 2022. p. 21 – 37.
- SOUZA, Sidney Araújo. **Efeito do plantio de *Acacia Mangium Willd.* (fabaceae) sobre a riqueza e diversidade arbórea em áreas de savana na amazônia setentrional**. Dissertação (mestrado em Recursos Naturais), Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Roraima, Roraima, 2014.
- TANG, X., *et al.* Can VIIRS continue the legacy of MODIS for near real-time monitoring of tropical forest disturbance?. *Remote Sensing of Environment*, v. 249, 2020.
- TURNER, B.L. The sustainability principle in global agendas: implications for understanding land-use/cover change. *The Geography Journal*, v. 163, n. 2, p. 133–140, 1997.
- TURNER, B.L., LAMBIN, E.F., REENBERG, A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, v. 104, n.1, p. 20666–20671, 2007.
- USTIN, S.L.; MIDDLETON, E.M. Current and near-term advances in Earth observation for ecological

applications. *Ecol. Process.* 10, 1–57, 2012.

VERBESSELT, J., ZEILEIS, A., HEROLD, M. Near real-time disturbance detection using satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, v. 123, p. 98–108, 2012.

WANG, M. et al. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation forests in Heilongjiang Province, China. *Forest Ecosystems*, v. 9, n. 1, 2022.

WINGFIELD, M.J.; BROCKERHOFF, B.D.; WINGFIELD, B. S. Plantation forest health: the need for a global strategy. *Science*, v. 349, n. 6250, p. 832–836, 2015.

WOODCOCK, C.E. *et al.* Free access to Landsat imagery. *Science*, v. 320, n. 5879, p. 1011, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.320.5879.1011a>. Acesso em: 5 de jul. 2023.

WULDER, M.A. *et al.* Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, v.122, p. 2–10, 2012.

XIN, Q.C., *et al.* Toward near real-time monitoring of forest disturbance by fusion of MODIS and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, v. 135, p. 234–247, 2013.

YE, S., *et al.* A near-real-time approach for monitoring forest disturbance using Landsat time series: Stochastic continuous change detection. *Remote Sensing of Environment*, v. 252, p. 1–17, 2021.

ZHE, Z.; SHI, Q.; SU, Y. Remote sensing of land change: A multifaceted perspective. *Remote Sensing of Environment*, v. 282, n., p. 1–20, 2022.

ZHU, Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 130, p. 370–384, 2017.

ZHU, Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 130, p. 370–384, 2017.

ZHU, Z. *et al.* Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sensing of Environment*, v. 224, p. 382–385, 2019.

Afiliación de los autores

Vera, J. J. M. - Professor na Universidad de Los Andes, Bogotá, Colômbia.

Tavares, S. S. - Professora en Universidad Federal de Roraima, Boa Vista (RR), Brazil.

Beserra Neta, L. C. - Professora en Universidad Federal de Roraima, Boa Vista (RR), Brazil.

Contribucion de los autores

Vera, J. J. M. - El autor contribuyó a la elaboración, realización y manipulación del escrito.

Tavares, S. S. - El autor contribuyó a la elaboración, realización y manipulación del escrito.

Beserra Neta, L. C. - El autor contribuyó a la elaboración, realización y manipulación del escrito.

Editores Responsables

Alexandra Maria Oliveira

Alexandre Queiroz Pereira