



# INFLUENCIA DE LA EXPANSIÓN EN LA FRAGMENTACIÓN DEL PAISAJE DE LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTA CRUZ - BOLIVIA

Raul Fernando Molina Rodriguez<sup>1</sup>  
Gloria Eliana Tórrez Castro<sup>2</sup>

**Resumen:** Ante la descontrolada expansión de las ciudades, es preocupante el impacto irreversible que se está causando a los ecosistemas del planeta tierra, y más aún, considerando que las ciudades se están extendiendo más de lo necesario, provocando principalmente la deforestación, degradación del suelo, contaminación ambiental y pérdida de biodiversidad. Esta urbanización es dinámica y dispersa, causando la fragmentación del paisaje, lo cual afecta a las interacciones que habían dentro de ese ecosistema. El presente estudio analizar y caracterizar la evolución de la fragmentación del paisaje natural de la Región Metropolitana de Santa Cruz, a partir de la expansión urbana, para contribuir a la formación de una visión crítica de las implicaciones de esta expansión dispersa. Para contar con evidencias científicas, se utilizan productos del LULC derivados de imágenes satelitales con una resolución de 10 m, además de métricas de la ecología del paisaje. El estudio muestra que la expansión urbana está fragmentando paisajes naturales y agrícolas, pero en una gran proporción se trata de loteamientos sin consolidación, es decir, suelo ocioso, que no está siendo utilizado para vivienda ni para agricultura, revelando la urgente necesidad de poner límites a este tipo de expansión.

**Palabras-Clave:** Expansión urbana; Fragmentación; Paisaje; Región metropolitana; Usos de suelo.

## INFLUENCE OF EXPANSIÓN ON THE FRAGMENTATION OF THE LANDSCAPE OF THE METROPOLITAN REGIÓN OF SANTA CRUZ - BOLIVIA

**Abstract:** Given the uncontrolled expansion of cities, the irreversible impact that is being caused to the ecosystems of planet Earth is worrying, and even more so, considering that cities are expanding more than necessary, mainly causing deforestation, soil degradation, pollution environmental and biodiversity loss. This urbanization is dynamic and dispersed, causing the fragmentation of the landscape,

---

<sup>1</sup> Postgrado en Geografía, Universidad Federal de Ceará (UFC). Email: fernando.molina@alu.ufc.br

<sup>2</sup> Postgrado en Geografía, Universidad Federal de Ceará (UFC). Email: gloriatorrez@alu.ufc.br



which affects the interactions that existed within that ecosystem. The present study analyzes and characterizes the evolution of the fragmentation of the natural landscape of the Metropolitan Region of Santa Cruz, based on urban expansion, to contribute to the formation of a critical vision of the implications of this dispersed expansion. To provide scientific evidence, LULC products derived from satellite images with a resolution of 10 m are used, as well as landscape ecology metrics. The study shows that urban expansion is fragmenting natural and agricultural landscapes, but in a large proportion it is unconsolidated subdivisions, that is, idle land, which is not being used for housing or agriculture, revealing the urgent need to set limits to this type of expansion.

**Keywords:** Urban sprawl; Fragmentation; Landscape; Metropolitan region; Land uses.

## INTRODUCCIÓN

Una gran preocupación para la humanidad es el rápido crecimiento de la población mundial que de acuerdo a pronósticos, se espera superar 8.500 millones en el año 2030 y 11.100 millones en el año 2100 (Sadigov, 2022, p. 2), que implica un alto impacto negativo en el planeta, debido a que se requerirán grandes cantidades de recursos no renovables para atender las necesidades de esta población.

Una de las consecuencias del alto crecimiento demográfico será la conversión de la superficie terrestre para usos urbanos, que es uno de los impactos más irreversibles en la biosfera global, debido a que está provocando una serie de externalidades negativas, que afectan y cambian a su entorno inmediato, como la deforestación, la degradación del suelo, la contaminación ambiental y la pérdida de biodiversidad. Es importante destacar que, en varias regiones del mundo, las tasas de expansión del suelo urbano, son más altas que el crecimiento de la población (Seto et al., 2011, p. 1), es decir que las ciudades están ocupando más suelo del necesario.

Una forma de expresión de estos cambios es en el paisaje, entendido como "el dominio de lo visible, lo que la vista abarca. No sólo está formado por formas, sino también por colores, olores, sonidos, texturas y otros elementos. Es el resultado de la interacción entre los elementos naturales y los elementos humanos"(Santos, 1996). Es decir, el paisaje es un concepto dinámico, que cambia constantemente a medida que los elementos naturales y humanos se modifican.

En ese sentido, existen elementos que constituyen al paisaje, y estos elementos pueden ser modificados por la interacción de diversos factores, que transforman la estructura espacial del hábitat natural, y en estos procesos complejos es donde se produce la fragmentación, que es el proceso dinámico por el cual, un determinado hábitat va quedando reducido a fragmentos o islas de menor tamaño, más o menos conectadas entre sí, en una matriz de hábitats diferentes al original, y que conlleva efectos espaciales.

Las principales causas de la fragmentación del paisaje se deben a la tala de árboles para la agricultura, ganadería, urbanización, o la construcción de



infraestructuras lineales como las carreteras o redes ferroviarias, creando barreras físicas que dividen hábitats naturales, estas barreras pueden impedir el movimiento de las especies de flora y fauna, que afecta su acceso a recursos como alimento, agua y refugio.

Según Pinto (2006) los procesos ecológicos frágiles ante la fragmentación del paisaje son aquellos que dependen de vectores de transmisión en el paisaje, como por ejemplo la dispersión de semillas, la polinización de las plantas, las relaciones de predador-presa, la dispersión de parásitos y epidemias, por su dependencia de vectores animales que a su vez tienen limitado el movimiento por el paisaje, es decir, tienen una reducida conectividad.

El área metropolitana de Santa Cruz, al igual que otras áreas metropolitanas en Bolivia y Latinoamérica, expresa en sus áreas de expansión una configuración espacial de crecimiento disperso, donde el suelo colindante, se va fraccionando y luego integrando a la mancha urbana; ante la ausencia o debilidad de instrumentos jurídicos que orienten espacialmente la ampliación de las ciudades bajo un patrón más compacto (Dávila; Alatorre; Bravo-Peña, 2021).

En resumen, el problema identificado es que la habilitación de suelo urbano de forma dispersa en la Región Metropolitana de Santa Cruz (RMSC), agrava la fragmentación del paisaje natural y afecta a los ecosistemas de la región.

Se parte de la hipótesis de que la expansión urbana dispersa de la RMSC provoca la fragmentación del paisaje natural, afectando a los ecosistemas de la región.

En ese sentido, para contar con evidencias científicas para el monitoreo y seguimiento de los cambios en el paisaje de la RMSC, se utilizan métricas de la ecología del paisaje, que permiten medir la fragmentación, aislamiento y conectividad, para identificar y definir las propiedades espaciales de los tipos de paisajes, especialmente los de los bordes de la mancha urbana (Dávila; Alatorre; Bravo-Peña, 2021).

Se plantea como objetivo: Analizar y caracterizar la evolución de la fragmentación del paisaje natural de la Región Metropolitana de Santa Cruz, a partir de la expansión urbana, en un periodo de 6 años 2017-2023. El periodo señalado fue planteado a partir de la disponibilidad de imágenes satelitales que permitan un análisis adecuado a escala urbana.

Para el logro del objetivo planteado, se identificó el cambio de uso de suelo en la RMSC en base al producto cartográfico LULC, generado a partir de imágenes satelitales Sentinel 2-A, procesado por ESRI y Microsoft, en base a estos productos, se calcularon las métricas de fragmentación del paisaje, se identificaron los sectores con mayor fragmentación del paisaje natural en áreas de expansión urbana y finalmente se realizó la caracterización de la fragmentación identificada.

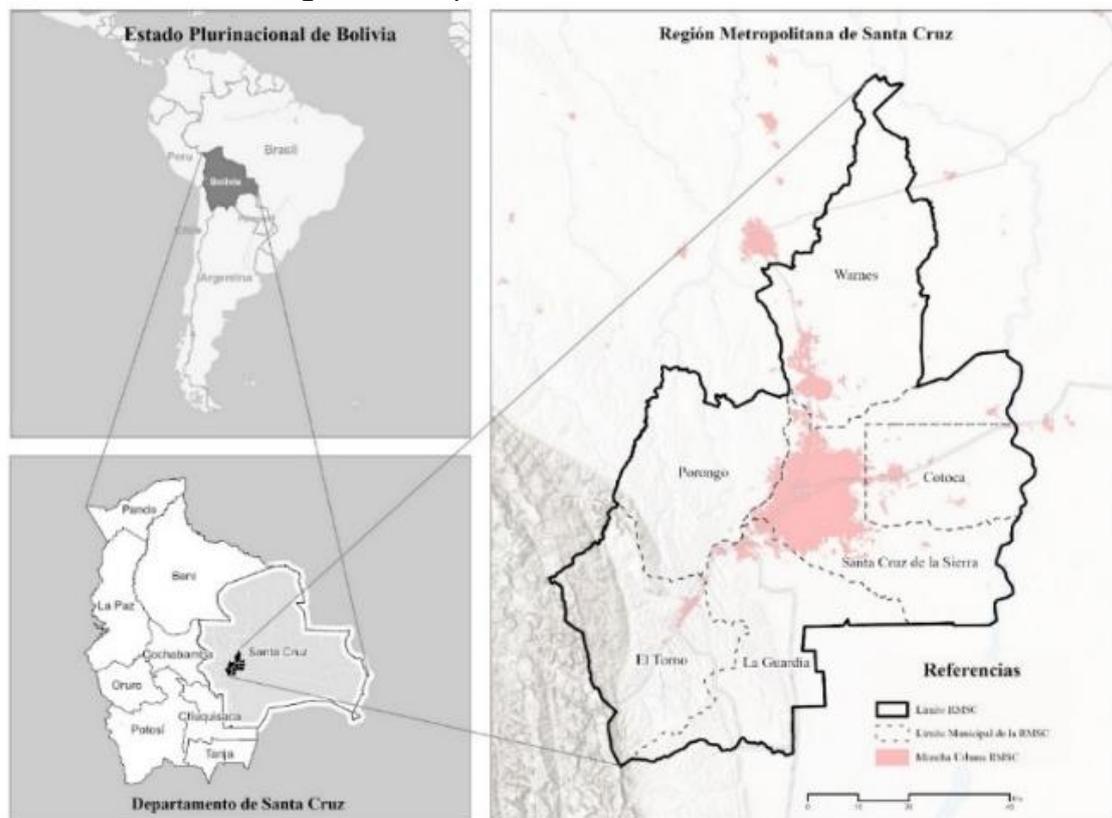
La finalidad de la investigación es aportar con una herramienta metodológica capaz de valorar los cambios ocurridos en el paisaje e identificar patrones que sirvan como insumos para la planificación y gestión del territorio, de esta manera, contribuye a la formación de una visión crítica de las implicaciones de la morfología de las ciudades hacia el entorno natural que las rodea.

## METODOLOGÍA

### ÁREA DE ESTUDIO

El área urbana de la Región Metropolitana de Santa Cruz es el conglomerado de ciudades más extenso y dinámico del País, se encuentra ubicado en el Departamento de Santa Cruz, al este del Estado Plurinacional de Bolivia, que a su vez se ubica en par parte central de Sudamérica (Figura 1). Los municipios que conforman la RMSC son: Warnes, Santa Cruz de la Sierra, Cotoca, Porongo, La Guardia y El Torno (GADSC, 2017); entre los seis aglomeran al 60% de la población del Departamento.

Figura 1. Mapa de ubicación de la RMSC



Fuente: preparado por los autores, 2024

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística la RMSC al 2018 tenía una proyección de población, de 2.144.452 habitantes, con una tasa anual de crecimiento del 2,9% y con una densidad de 336 hab/km<sup>2</sup> (Gadsc, 2017).

La determinación del área de estudio se realizó con base en la zona de presión intermunicipal, conformada por las áreas susceptibles al desarrollo urbanístico, ubicada entre los seis municipios conurbados, la cual, se encuentra actualmente inmersa en una fuerte presión inmobiliaria.



La migración fue el principal factor de su incremento poblacional, que a su vez, aceleró el crecimiento expansivo y desordenado de la mancha urbana, y provocó un alto fraccionamiento y venta de suelo en la periferia, que constituyó un gran negocio para los inversionistas y una alternativa para la población que necesitaba terrenos baratos para construir sus viviendas (Gadsc, 2017, p.30), teniendo a la fecha, un creciente boom inmobiliario sometido a altas intervenciones, como rellenos para construir viviendas, complejos industriales y construcción de infraestructuras de transporte que reducen su naturalidad y afectan su biodiversidad (Rojas et al., 2017), y ante este escenario, se encuentran entidades públicas rebasadas en su capacidad institucional para hacer frente a estos desafíos para la gestión y administración del territorio.

La RMSC se caracteriza por una urbanización en terrenos de baja pendiente, rellenos y en ocasiones inundables, expandiéndose a terrenos de mayor pendiente, resultando un paisaje donde conviven humedales, lagunas, plantaciones forestales y urbanización.

La principal aglomeración urbana de la RMSC es la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, a partir de ella se articulan y conurban las demás aglomeraciones; esta ciudad presenta características de alta vegetación y recursos forestales, planificada inicialmente en anillos concéntricos, ha sido desbordada por el crecimiento poblacional y la urbanización en sus diferentes formas (lineal, aislada o continua), que afecta al tamaño, forma y número de parches de paisajes naturales y seminaturales, la conectividad entre parches y su aislamiento, entre otros, influyendo sobre numerosos procesos ecológicos.

La Región Metropolitana de Santa Cruz, de acuerdo con las Ecorregiones Territoriales del Mundo propuesto por Olson et al. (2001), está distribuida en tres ecorregiones denominadas: Bosques Secos Chiquitanos, Yungas Bolivianos y Chaco Seco.

El Bosque Seco Chiquitano cubre en su totalidad a los municipios de Warnes, Cotoca y una parte importante de Santa Cruz de la Sierra; mientras que el Chaco Seco cubre: Porongo, La Guardia y El Torno, incluyendo una pequeña sección en el área sudoeste de Santa Cruz de la Sierra; asimismo, la ecorregión Yungas Bolivianos abarca las áreas rurales del oeste de Porongo y El Torno.

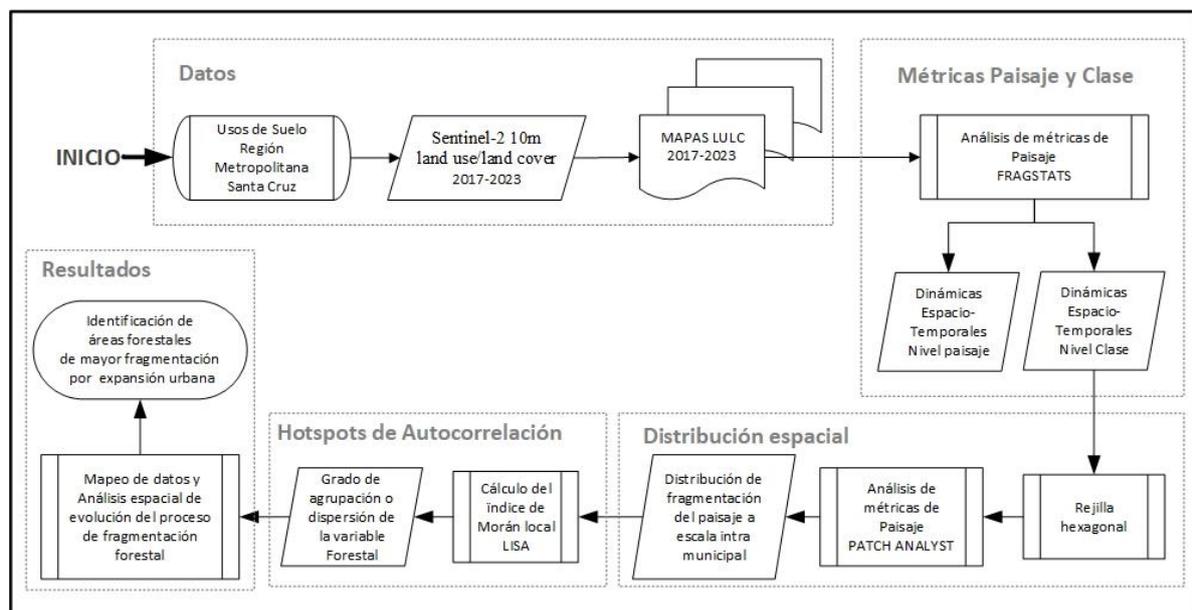
## ESQUEMA METODOLÓGICO

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo del estudio, que consiste en 5 etapas: a) datos; b) Métricas de Paisaje y Clase; y c) Distribución espacial, d) Hotspots de autocorrelación y finalmente, e) Resultados. En cada etapa existen insumos o acciones y resultados, para lograr cumplir con el objetivo trazado.

A partir de la selección del área de estudio y los datos de usos de suelo, se procede al cálculo de métricas de paisaje para los años 2017 y 2023, para evaluar la fragmentación en ese periodo se utiliza la herramienta FRAGSTATS; luego se analizan las dinámicas espacio temporales a nivel de paisaje y clase para la escala metropolitana y municipal generando un primer reporte estadístico; posteriormente para identificar la distribución espacial al interior de la RMSC se utiliza una grilla

hexagonal y se genera un nuevo cálculo de métricas utilizando la extensión Patch Analyst, cuyo reporte es insumo para visualizar la distribución de los parches y sus variables correspondientes. Finalmente, se realiza el análisis espacial identificando la reducción o incrementos de las superficies o número de parches y combinando con otra información temática de interés generando mapas coropléticos como evidencia y respuesta al objetivo planteado, como se visualiza en la figura 2.

Figura 2. Esquema metodológico



Fuente: Propia en base a Onilude; Vaz (2020)

## FUENTE DE DATOS

Esta investigación utiliza como tipo de datos los usos de suelo, que son los productos generados por el Mapa Global de Uso/Cobertura del suelo (Land Use/Land Cover -LULC), derivado de imágenes Sentinel-2, de la Agencia Espacial Europea (ESA), con una resolución de 10 m (conjunto de datos: Sentinel-2 10m land use/land cover time series). Estos productos son generados de forma anual, a partir de un modelo de clasificación de suelo, usando herramientas de Inteligencia Artificial, el modelo es entrenado utilizando billones de píxeles de imágenes etiquetados por humanos de la National Geographic Society (NGS).

Los mapas globales se producen aplicando este modelo a la colección de imágenes Sentinel-2 Nivel-2A en la Computadora Planetaria de Microsoft (fuente: Impact Observatory, Microsoft, Esri), procesando más de 400.000 observaciones de la Tierra por año (Karra et al., 2021).

El algoritmo genera predicciones de del Uso/Cobertura del suelo (LULC) para once clases: Agua, árboles, vegetación inundada, cultivos, área construida, suelo desnudo, hielo/nieve, nubes y pastizales como detalla Karra et al. (2021).



Los productos LULC están disponibles desde la habilitación del sensor Sentinel 2A, es decir, desde el año 2017, en ese sentido, para la investigación se utilizaron los productos del área de estudio del periodo 2017-2023. Otra ventaja por la cual se decidió utilizar este producto es su resolución espacial de 10 metros, que ofrece mejor calidad temática, a escala urbana y regional, al momento de la identificación de objetos del paisaje, además de la disponibilidad de estos productos sin restricción alguna. En ese entendido el corte temporal del estudio fue planteado a partir de la disponibilidad de imágenes satelitales que permitan un análisis adecuado a escala urbana y metropolitana.

Los datos y análisis de la información fueron soportados y procesados en el software FRAGSTATS Versión 4.2 (Mcgarigal; Ene, 2023) y la extensión Patch Analyst bajo soporte de ArcGIS 10.8.

Una vez extraídos los productos LULC de las imágenes Sentinel 2A, para cada una de las fechas definidas, se convierte el archivo a formato TIF, para que pueda ser procesado por el software FRAGSTATS (Mcgarigal; Ene, 2023), donde se pueden calcular las métricas respectivas a nivel de paisaje, clase y parche.

## CÁLCULO DE MÉTRICAS DE PAISAJE

Existen trabajos similares, donde utilizan métricas de paisaje de tipo espacial, como instrumento de monitoreo para los procesos de cambio del paisaje (Camelo; Castro; Ferreira, 2012) cuyo común denominador es el uso de los Sistemas de información Geográfica, Sensores Remotos (Galoppo, 2017) y de la aplicación FRAGSTATS para medir métricas a nivel de paisaje y clases (Barros, 2018; Dávila; Alatorre; Bravo-Peña, 2021; Rojas et al., 2017) sin embargo, estos estudios generan productos con resoluciones mayores o iguales a 30 metros para escalas municipales o metropolitanas.

El presente estudio, también utiliza software FRAGSTATS, considerando la interfaz amigable que ofrece la herramienta, su frecuente actualización y su vinculación a los sistemas de información geográfica de mayor uso como QGIS, ARCGIS y R.

Para el cálculo de métricas a nivel de Paisaje y Clase, se han seleccionado de forma previa los índices relacionados a la fragmentación, forma y dispersión.

Una vez seleccionados los índices, se han procesado los productos LULC con el software FRAGSTATS, obteniendo como resultado las métricas seleccionadas en formato de tabla. Con la información obtenida se ha generado una base de datos de métricas a nivel de paisaje y clase para las áreas geográficas de estudio (región metropolitana y municipios).

Se decidió realizar el cálculo de métricas de paisaje a nivel clase, para los seis municipios que conforman la RMSC, con el fin de identificar las clases dominantes en cada municipio y su fragmentación, visualizando sus particularidades, considerando que la administración y gestión de lo urbano se lo realiza a nivel municipal.



## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA FRAGMENTACIÓN A NIVEL DE GRILLA

Para profundizar el análisis respecto a su distribución espacial, se ha trabajado con una nueva subdivisión espacial más pequeña a la municipal, para lo cual se utiliza una grilla hexagonal de 100 km<sup>2</sup>, considerando que los hexágonos son los polígonos regulares que conservan las propiedades más cercanas a las del círculo (Birch; Oom; Beecham, 2007; Fuenzalida et al., 2015).

El planteamiento de la grilla como herramienta se basa en dos trabajos previos: el primero, utilizado para visualizar la distribución espacial del empleo formal realizado en Buenos Aires – Argentina (Alves et al., 2018), y el segundo, que trata sobre la Conservación en la Cuenca Amazónica Occidental elaborado por Josse et al. (2013).

A partir de la grilla hexagonal, nuevamente se ha realizado el cálculo de métricas a nivel de clase, esta vez, utilizando la extensión de Patch Analyst, que permite procesar las métricas de paisaje sobre áreas a escalas de mayor detalle (Camelo; Castro; Ferreira, 2012; Pereira dos Santos, 2020; Zambrano et al., 2022); teniendo como resultado valores de fragmentación del paisaje, que permiten visualizar la distribución de la fragmentación a nivel intra-municipal.

## HOTSPOTS DE FRAGMENTACIÓN A PARTIR DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL

La autocorrelación espacial es la tendencia de los valores similares a agruparse en el espacio y se mide utilizando el índice estadístico espacial de Moran Local Univariante (LISA), con un nivel de significancia  $p=0,001$ . El índice LISA es una medida estadística que cuantifica la autocorrelación espacial a nivel local para una variable específica. Un valor de cero indica que no hay autocorrelación espacial local, mientras que un valor positivo indica autocorrelación espacial local alta en color rojo (alto-alto); y un valor negativo indica autocorrelación espacial local baja en color azul (bajo-bajo).

A partir de la grilla generada y los valores obtenidos a nivel hexagonal, mediante el uso del software GeoDa se calcula las autocorrelaciones espaciales al interior de la región metropolitana, obteniendo como resultado “Hotspots” de fragmentación, que permiten identificar la concentración de la fragmentación de áreas forestales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ESCALA METROPOLITANA NIVEL PAISAJE

Realizada la caracterización del uso de suelo en la RMSC en base a productos LULC, se ha identificado que para el año 2017 la clase con mayor ocupación en la RMSC es el tipo forestal, con 2.394 Km<sup>2</sup> (38,9%), seguida de la clase tipo cultivos con 1.804 Km<sup>2</sup> (29,4%) y la clase tipo pastizales con 1.283 km<sup>2</sup> (20,9%). La clase de área construida ocupa 587,6 km<sup>2</sup> que aproximadamente equivale al 9,6% de la RMSC (Tabla 1).



Es importante destacar que existe una concentración de ciertos usos en algunos municipios, como por ejemplo, la clase forestal se encuentra concentrada principalmente en los municipios de El Torno, Porongo y La Guardia; la clase cultivos se encuentra en una gran proporción en los municipios de Warnes, Cotoca, Santa Cruz de la Sierra y la clase de área construida predomina en el municipio de Santa Cruz de la Sierra.

Realizada la comparación de los cambios los usos de suelo del año 2017 y del 2023, se puede notar como principales cambios: La reducción de 132 km<sup>2</sup> de cultivos (de 1.804 a 1672 km<sup>2</sup>); el incremento de 128,6 km<sup>2</sup> de área construida (de 588 a 7116 km<sup>2</sup>) y respecto a sus tasas de cambio, la clase de vegetación inundada es la que muestra un incremento en un 206,23%, la clase de suelo desnudo una reducción del 46,54% y la clase de área construida se ha incrementado en un 21,88%.

De la identificación de las variaciones de las métricas de fragmentación a nivel de paisaje de la RMSC, se obtuvo una reducción del número de parches de 51.787 a 49.128 parches, es decir se han reducido 2.659 parches, al igual que la distancia media al parche más próximo en 2,53 m (de 87,9 m a 85,4 m) y además el tamaño medio de los parches se ha incrementado de 11,87 a 12,51 que evidencia una reducción de la fragmentación en la RMSC.

Como los datos son generales a nivel metropolitano, no facilita la identificación sobre cuáles de las clases son las que se fraccionan y cuales al parecer, se fusionan, por ello se tuvo la necesidad de analizar los datos a una escala menor (municipal), para verificar el comportamiento de la fragmentación en distintos sectores de la RMSC.

## ESCALA MUNICIPAL A NIVEL PAISAJE

Realizado el ejercicio a nivel municipal, se evidencia que al 2023 los municipios con mayor cantidad de parches son Warnes (12.618), Santa Cruz de la Sierra (11.242), Cotoca (8.904) y La Guardia (7.348), de los cuales solo el municipio de Cotoca presenta un incremento en la cantidad de parches entre los años 2017 y 2023, que pasó de 8.513 a 8.904, alcanzando un incremento de 391 parches, que son aproximadamente 65 parches nuevos cada año; por otra parte, a pesar de contar con elevada cantidad de parches los municipios de Santa Cruz de la Sierra y Warnes presentan un decremento notable en la cantidad de parches (-1.219 y -1.052 respectivamente), esto que evidencia que los parches antes conformados están siendo fusionados entre sí con el avance de la urbanización (Tabla 1).

Los municipios que presentan un mayor tamaño medio de parches son El Torno y Porongo, sin embargo, los que han mostrado un mayor incremento entre los años 2017 y 2023 son los municipios de El Torno (de 17,74 a 19,64) y Santa Cruz de la Sierra (de 10,42 a 11,55), siendo el municipio de Cotoca el único en mostrar una reducción en el tamaño medio del parche de 7,29 a 6,97, lo que denota que el municipio está siendo altamente fragmentado en comparación con los otros 5 municipios.

En el Cálculo de la distancia media al parche más próximo, se muestra que los municipios de Porongo (110) y el Torno (108) presentan las distancias más largas



entre parches, esto significa que están menos fragmentados, por su parte, el municipio de Cotoca presenta los valores más bajos (72), que confirma la alta fragmentación en su interior. Es importante destacar que el Municipio de Porongo, a pesar de contar con distancias medias más largas entre parches, presenta un decremento en la métrica (-10), esto indica que su territorio presenta indicios de fragmentación.

Tabla 1. Variaciones métricas de fragmentación a nivel Municipal

Área Geográfica	Año	Total area Km2	Número de parches	Densidad de parches	Tamaño Medio de Parches	Compacidad Media de los Parches	Índice de forma media	Índice de diversidad de Shannon	Distancia Media al Parche más Próximo
Región Metropolitana	2017	6.146	51787	8,43	11,87	39,83	1,36	1,34	87,91
	2023		49128	7,99	12,51	41,16	1,35	1,35	85,37
	<b>Diferencia</b>		<b>-2659</b>	<b>-0,43</b>	<b>0,64</b>	<b>1,33</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-2,53</b>
Cotoca	2017	621	8513	13,72	7,29	34,67	1,34	1,31	70,86
	2023		8904	14,35	6,97	34,72	1,33	1,36	72,30
	<b>Diferencia</b>		<b>391</b>	<b>0,63</b>	<b>-0,32</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>1,44</b>
El Torno	2017	969	5465	5,64	17,74	46,69	1,40	0,62	106,81
	2023		4935	5,09	19,64	51,82	1,42	0,65	107,99
	<b>Diferencia</b>		<b>-530</b>	<b>-0,55</b>	<b>1,91</b>	<b>5,13</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>1,18</b>
La Guardia	2017	977	7362	7,53	13,27	46,09	1,37	1,28	94,78
	2023		7348	7,52	13,30	45,65	1,37	1,29	93,22
	<b>Diferencia</b>		<b>-14</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,44</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>-1,56</b>
Porongo	2017	939	5060	5,39	18,56	50,14	1,40	0,79	120,11
	2023		4864	5,18	19,30	51,55	1,41	0,76	110,25
	<b>Diferencia</b>		<b>-196</b>	<b>-0,21</b>	<b>0,75</b>	<b>1,42</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,03</b>	<b>-9,86</b>
Santa Cruz de la Sierra	2017	1.299	12461	9,59	10,42	39,96	1,36	1,43	83,05
	2023		11242	8,66	11,55	41,54	1,35	1,40	83,34
	<b>Diferencia</b>		<b>-1219</b>	<b>-0,94</b>	<b>1,13</b>	<b>1,58</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,30</b>
Warnes	2017	1.342	13670	10,19	9,81	37,71	1,34	1,13	81,59
	2023		12618	9,41	10,63	40,03	1,34	1,20	83,88
	<b>Diferencia</b>		<b>-1052</b>	<b>-0,78</b>	<b>0,82</b>	<b>2,32</b>	<b>0,00</b>	<b>0,08</b>	<b>2,29</b>

Fuente: preparado por los autores, 2024

Los municipios Warnes, Santa Cruz y Cotoca presentan características más urbanas, a ello se debe su alta fragmentación, sin embargo, solo el Municipio de Cotoca muestra un incremento de parches en los 6 años, debido a que, en el resto de los municipios, los casos en el que la mancha urbana está cubriendo los parches más pequeños son más recurrentes.

#### ESCALA MUNICIPAL A NIVEL DE CLASE

Realizado el ejercicio a nivel de clases, para los municipios que conforman la RMSC, se identificó lo siguiente:

En el municipio de Warnes, el más grande de la RMSC, predomina la clase cultivos con, aunque durante el periodo 2017-2023 hubo una disminución de 6,11%, es decir, redujo de 56% a 50% el área cultivable del municipio. En el mismo periodo hubo también un incremento de la superficie construida de 1,5% y un ligero incremento



de la cobertura forestal del 2%. Respecto a las métricas de paisaje, la clase cultivos presenta un incremento en el número de parches de 1.714 a 1.783, evidenciando un proceso de fragmentación, debido a la mezcla entre lo urbano y lo rural; en lo que se refiere a lo forestal y área construida existe un ligero incremento de parches.

En Santa Cruz de la Sierra, municipio capital del Departamento de Santa Cruz, alberga 1.7 millones de personas al año 2020 según el INE (2016), de acuerdo a la Tabla 4, predominan las clases: cultivos y áreas construidas, sin embargo, a pesar de la predominancia de la clase cultivos, el 2023 sufrió una disminución porcentual de 1,51 (de 36% a 34,6%), mientras que la clase área construida incrementó en estos 6 años el 4% respecto al año 2017 (de 27% a 31%) ; en cuanto a las métricas de paisaje, se observa que tanto la clase forestal, área construida y cultivos disminuyen en el número de parches respecto al 2017, evidenciando una consolidación del conglomerado urbano es decir, incrementado el tamaño promedio de los parches.

Respecto al municipio de la Guardia, es el tercer municipio en tamaño, predomina la clase forestal, seguida por la de cultivos; aunque para el 2023 la superficie forestal sufrió una reducción del 1,59% (de 45% a 43%) y la de cultivos se incrementó 1,38% de superficie (de 25% a 26,34%) respecto al 2017. En cuanto a las métricas de paisaje se observa incremento significativo en el número de parches en la clase forestal de 1092 a 1218 y una reducción en el tamaño promedio de parches lo que alerta un incremento en la fragmentación de la clase forestal.

El municipio de El Torno con características más rurales, donde el crecimiento urbano se debe principalmente por el paso de la carretera F7 hacia los valles cruceños, presenta una predominancia en la clase forestal, aunque existe una disminución del 1,4% de su área el 2023 (de 84% a 82%) respecto al municipio, asimismo se percibe un incremento del 1,5% en la clase pastizales (de 8,56% a 10,07%); en cuanto a las métricas de paisaje se evidencia una reducción en el número de parches en la clase cultivos en un 13% provocando un incremento en el tamaño promedio del parche; asimismo, un incremento en el número de parches de la clase área construida del 24% respecto al año 2017; este último dato explica la presión reciente de la urbanización hacia los paisajes de cultivos y superficies forestales.

Porongo, al igual que el municipio antecesor tiene características rurales, sin embargo, en este último tiempo ha sido objeto de ocupación por nuevas urbanizaciones privadas; las clases más representativas son la forestal y pastizal, con incremento en la superficie forestal de 1,72% (de 70% a 71,6%) y reducción en la clase pastizal de 1,63% (de 25,5% a 24%); asimismo en las métricas calculadas destacan: la reducción del número de parches de la clase cultivos y área construida de 28% y 10% respectivamente. Esto denota un crecimiento del tamaño promedio del parche de las áreas construidas del 40% y la fragmentación del suelo desnudo al disminuir su tamaño en un 54%, probablemente esto se debe al crecimiento urbano disperso al cual está inmerso este territorio como complejos hoteleros, parques temáticos y condominios privados.

Finalmente, el municipio de Cotoca (Tabla 2), el de menor superficie respecto al total de municipios pertenecientes a la RMSC, con alto dominio de la clase cultivos pese a su reducción del 5% respecto al 2017 (de 46,4% a 41%), seguido por las clases pastizal (de 25,8% a 26,8%) y forestal (de 17,73% a 19,94%), estas dos últimas con

incrementos del 1% y 1.5% respectivamente. Respecto a las métricas de paisaje, se cuenta con un elevado incremento en el número de parches en superficies de suelo desnudo y reducción del número de parches de clase pastizal 13%; por otro lado, existe un incremento del tamaño promedio del parche en la clase área construida del 34% y la reducción del tamaño en las superficies cultivables; este último caso se explica a raíz de la consolidación del proceso de conurbación con la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

Tabla 2. Variaciones de las métricas de fragmentación por clase a nivel Municipal

Área Geográfica	Año	2017				2023				Diferencia del % de Clase
	Clase	Total Área Km2	% Clase	Número de parches	Tamaño Medio de Parches	Total Área	% Clase	Número de parches	Tamaño Medio de Parches	
Santa Cruz de la Sierra	Agua	12.96	1.00	228	5,68	10,28	0,79	308	3,34	-0,21
	Pastizales	244,28	<b>18,81</b>	<b>5.159</b>	4,74	207,30	<b>15,96</b>	<b>4.017</b>	5,16	-2,85
	Forestal	207,00	<b>15,94</b>	<b>1.896</b>	10,92	219,79	<b>16,92</b>	<b>1.851</b>	11,87	0,99
	Vegetación inundada	0,27	0,02	64	0,42	2,40	0,18	180	1,33	0,16
	Cultivos	469,03	<b>36,11</b>	<b>3.889</b>	12,06	449,40	<b>34,60</b>	<b>3.124</b>	14,39	-1,51
	Área construida	349,27	<b>26,89</b>	969	<b>36,04</b>	402,45	<b>30,99</b>	840	<b>47,91</b>	<b>4,09</b>
	Suelo desnudo	15,97	1,23	255	6,26	7,16	0,55	922	0,78	-0,68
Wames	Agua	3,31	0,25	153	2,16	4,36	0,32	244	1,79	0,08
	Pastizales	340,70	<b>25,40</b>	<b>6.130</b>	5,56	374,58	<b>27,92</b>	<b>4.680</b>	8,00	<b>2,53</b>
	Forestal	170,07	<b>12,68</b>	<b>1.714</b>	9,92	198,72	<b>14,81</b>	<b>1.783</b>	11,15	<b>2,14</b>
	Vegetación inundada	0,56	0,04	56	1,00	0,42	0,03	88	0,48	-0,01
	Cultivos	749,32	<b>55,85</b>	<b>4.727</b>	15,85	667,38	<b>49,75</b>	<b>4.873</b>	13,70	-6,11
	Área construida	75,17	5,60	710	10,59	94,89	7,07	743	12,77	<b>1,47</b>
	Suelo desnudo	2,46	0,18	180	1,36	1,24	0,09	206	0,60	-0,09
Porongo	Agua	5,49	0,58	388	1,41	5,42	0,58	354	1,53	-0,01
	Pastizales	239,98	<b>25,56</b>	<b>2.246</b>	10,69	224,67	<b>23,93</b>	<b>2.236</b>	10,05	-1,63
	Forestal	656,32	<b>69,90</b>	830	<b>79,07</b>	672,45	<b>71,62</b>	783	<b>85,88</b>	<b>1,72</b>
	Vegetación inundada	0,28	0,03	21	1,33	0,07	0,01	23	0,32	-0,02
	Cultivos	4,43	0,47	624	0,71	2,55	0,27	448	0,57	-0,20
	Área construida	21,68	2,31	565	3,84	27,33	2,91	509	5,37	0,60
	Suelo desnudo	10,74	1,14	386	2,78	6,42	0,68	508	1,26	-0,46
La Guardia	Agua	1,15	0,12	97	1,18	0,74	0,08	103	0,72	-0,04
	Pastizales	214,61	<b>21,96</b>	<b>3.042</b>	7,05	200,39	<b>20,51</b>	<b>2.904</b>	6,90	-1,45
	Forestal	438,23	<b>44,85</b>	<b>1.092</b>	<b>40,13</b>	422,72	<b>43,26</b>	<b>1.218</b>	<b>34,71</b>	-1,59
	Vegetación inundada	0,03	0,00	9	0,35	0,00	0,00	2	0,06	0,00
	Cultivos	243,95	<b>24,97</b>	<b>2.369</b>	10,30	257,42	<b>26,34</b>	<b>2.285</b>	11,27	<b>1,38</b>
	Área construida	70,77	7,24	647	10,94	90,23	9,23	692	13,04	<b>1,99</b>
	Suelo desnudo	8,41	0,86	106	7,94	5,64	0,58	144	3,92	-0,28
El Torno	Agua	2,10	0,22	142	1,48	2,20	0,23	103	2,13	0,01
	Pastizales	83,01	8,56	<b>2.997</b>	2,77	97,66	10,07	<b>2.657</b>	3,68	<b>1,51</b>
	Forestal	812,02	<b>83,76</b>	578	<b>140,49</b>	798,66	<b>82,38</b>	559	<b>142,87</b>	-1,38
	Cultivos	49,42	5,10	<b>1.330</b>	3,72	42,52	4,39	<b>1.155</b>	3,68	-0,71
	Área construida	21,61	2,23	328	6,59	27,98	2,89	408	6,86	0,66
	Suelo desnudo	1,27	0,13	85	1,49	0,42	0,04	53	0,80	-0,09
	Cotocha	Agua	3,92	0,63	160	2,45	2,68	0,43	146	1,84
Pastizales		160,34	<b>25,84</b>	<b>3.875</b>	4,14	166,61	<b>26,85</b>	<b>3.385</b>	4,92	<b>1,01</b>
Forestal		110,02	<b>17,73</b>	<b>1.080</b>	10,19	119,40	<b>19,24</b>	<b>1.176</b>	10,15	<b>1,51</b>
Vegetación inundada		0,16	0,03	39	0,40	1,08	0,17	99	1,09	0,15
Cultivos		287,87	<b>46,39</b>	<b>2.667</b>	10,79	252,75	<b>40,73</b>	<b>2.919</b>	8,66	-5,66
Área construida		49,06	7,90	606	8,10	73,27	11,81	675	10,85	<b>3,90</b>
Suelo desnudo		9,25	1,49	86	10,76	4,82	0,78	504	0,96	-0,71
RMSC	Agua	28,93	0,47	1.104	2,62	25,68	0,42	1.204	2,13	-0,05
	Pastizales	1282,92	<b>20,87</b>	<b>23.185</b>	5,53	1271,21	<b>20,68</b>	<b>19.591</b>	6,49	-0,19
	Forestal	2393,66	<b>38,94</b>	<b>7.018</b>	<b>34,11</b>	2431,75	<b>39,56</b>	<b>7.193</b>	<b>33,81</b>	0,62
	Vegetación inundada	1,30	0,02	184	0,71	3,97	0,06	391	1,02	0,04
	Cultivos	1804,02	<b>29,35</b>	<b>15.476</b>	11,66	1672,02	<b>27,20</b>	<b>14.687</b>	11,38	-2,15
	Área construida	587,56	<b>9,56</b>	<b>3.776</b>	15,56	716,14	<b>11,65</b>	<b>3.802</b>	18,84	<b>2,09</b>
	Suelo desnudo	48,10	0,78	<b>1.039</b>	4,63	25,72	0,42	<b>2.256</b>	1,14	-0,36

Fuente: preparado por los autores, 2024



Es importante destacar que al 2023, los municipios de El Torno, Porongo y La Guardia cubren el 78% de la superficie forestal de la RMSC, sin embargo, entre el 2017 y 2023 se ha reducido la superficie en 2%, pero sin incremento significativo en el número de parches; esto sucede en los casos con amplia cobertura boscosa, donde solo se reduce el polígono, pero no se fracciona.

Respecto a la clase cultivos, los municipios de Warnes y Cotoca son los que tienen una alta representación (50% y 41% respectivamente), asimismo son los que presentan mayor tasa de cambio, en la cantidad de parches con 3% y 9,45%.

Por el contrario, los municipios que presentan una tasa de cambio negativa, en la cantidad de parches de la clase área construida son Santa Cruz de la Sierra (13,3%) y Porongo (10%). Sin embargo, considerando su incremento de superficie (4% y 0,60%), podemos indicar que los parches del área construida están siendo unificados y por eso se reduce su cantidad, lo cual evidencia un proceso de integración de áreas urbanizadas.

De manera general, los municipios que presentan una alta reducción en los valores de superficie forestal entre el 2017-2023 son: La Guardia con 1,59 y El Torno 1,38; sin embargo, los municipios de La Guardia, Cotoca y Warnes son los que presentan mayores tasas de cambio, respecto al número de parches de la clase forestal (11,5%, 9% y 4% respectivamente). En consecuencia, el municipio con mayor disminución de la superficie forestal (4%) y que a su vez presenta el mayor incremento en la cantidad de parches de clase forestal (12%) es La Guardia.

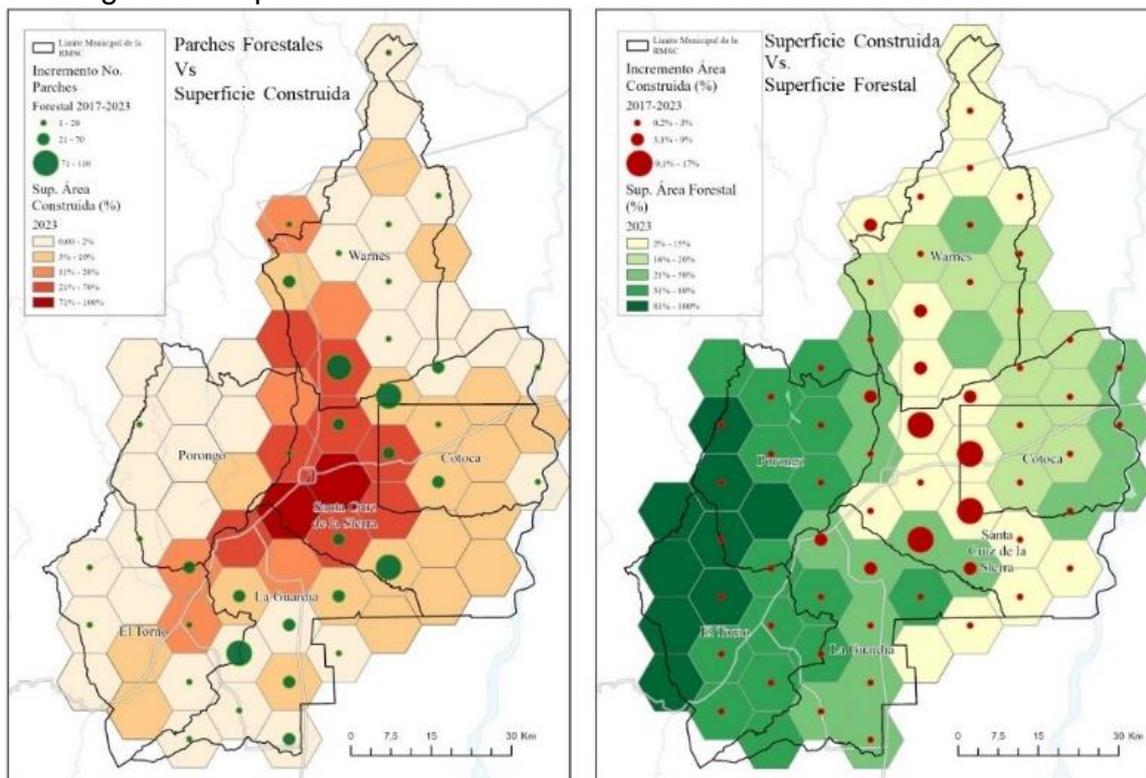
## DISTRIBUCIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN

Realizada la medición a nivel de la grilla hexagonal, se puede observar la distribución de la fragmentación a mayor detalle, para esta investigación nos centramos en el análisis de la relación entre la clase construida y la clase forestal. En el primer mapa de la Figura 3, se muestra la distribución espacial de la superficie construida en porcentaje, respecto a la superficie de la Grilla (100km<sup>2</sup>) al 2023, y se sobrepone el porcentaje de incremento (2017-2023) en el número de parches forestales; en este mapa se concluye que el incremento de parches Forestales se está dando en el área de expansión de la mancha urbana, en direcciones Norte y Sur, además el mayor incremento de número de parches se da en superficies de área construida entre 3 y 10%. El mapa también nos muestra que el fraccionamiento del área forestal no solo se está dando por la expansión de la superficie construida, como es el caso del sector Las Trancas y Almendras, entre los municipios de La Guardia y El Torno, donde este fraccionamiento de área forestal responde al incremento de superficie de cultivos.

El segundo mapa de la figura 3, visualiza el porcentaje de la superficie forestal por cada celda de la grilla, y el porcentaje de incremento del área construida en el periodo 2017-2023; el mapa demuestra que existe un incremento alto del área construida en áreas de expansión de la mancha urbana en dirección Nordeste y Sur, sin embargo, hacia el Nordeste existe una baja cobertura vegetal (entre el 2 y 15%), mientras que al sur el porcentaje de superficie forestal afectada es de entre 21 a 50%, el mapa también muestra una tendencia de incremento de superficie construida en el

eje Norte a lo largo de la doble vía Santa Cruz-Warnes, que aceleró la oferta de nuevos proyectos inmobiliarios, como la Nueva Santa Cruz.

Figura 3. Mapas de Área Construída Vs. Forestal de la RMSC



Fuente: preparado por los autores, 2024

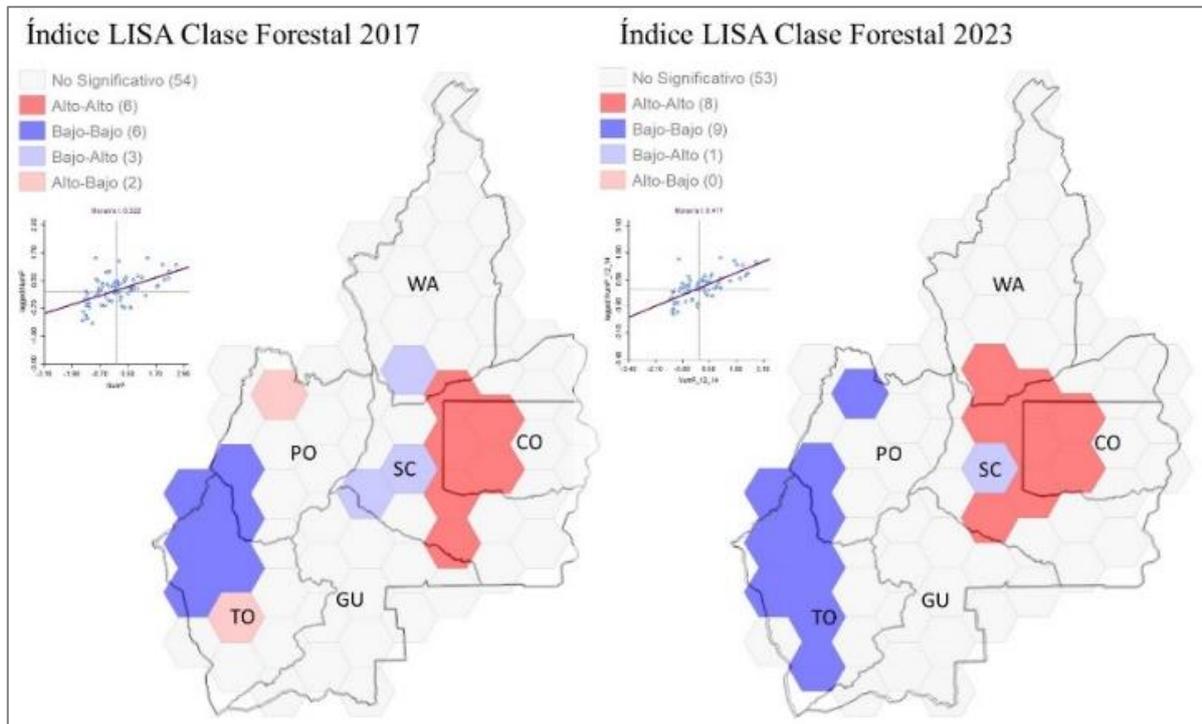
Es importante considerar que se está produciendo leve incremento del área construida en sectores con alto porcentaje de superficie forestal, específicamente al Oeste de los municipios de El Torno y Porongo.

### HOTSPOTS DE LA FRAGMENTACIÓN – AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL

Considerando el objetivo planteado, analizaremos la autocorrelación univariante de la clase forestal. Los resultados muestran que el índice de moran univariante del número de parches de la clase forestal paso de 0,32 el año 2017 a 0,42 al año 2023, que indica un incremento en la concentración del número de parches de tipo forestal.



Figura 4. Índice LISA para el número de parches de clase forestal de la RMSC (2017 -2023)



Fuente: preparado por los autores, 2024

A partir de la Figura 4, se observa la presencia de altos niveles de fragmentación forestal (color rojo) en Santa Cruz de la Sierra y Cotoca el año 2017, y el año 2023 se expande al sur hacia el Norte a Warnes. Por otro lado, hacia el Suroeste (Porongo y El Torno) existen concentraciones de bajos niveles de fragmentación de parches tipo forestal (color azul) el 2017, para el año 2023 se expande hacia el sur del municipio de El Torno.

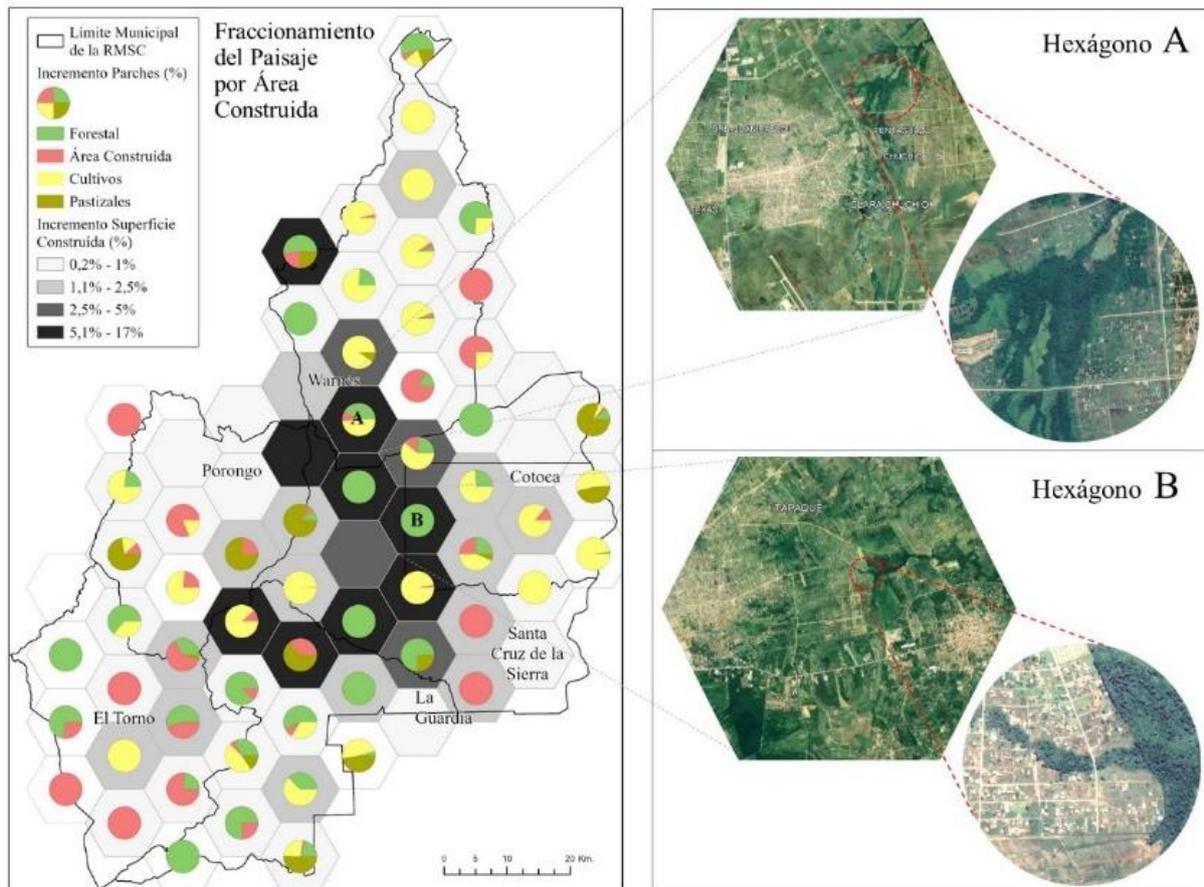
## ANÁLISIS ESPACIAL DE LA EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE FRAGMENTACIÓN FORESTAL

Realizado el análisis de la evolución del paisaje en el periodo de estudio, se puede evidenciar que existe un alto incremento (entre 5 a 17%) de la superficie construida en una faja circundante a la mancha urbana de la RMSC, que recorre de Norte a Sur, en forma de luna creciente, esta franja de alta concentración varía entre aproximadamente 10 a 20 Km, con tendencia de expansión al Norte (Figura 5).

Para complementar el análisis se adicionan el incremento de parches según clase, de las 4 clases más representativas a nivel metropolitano (Forestal, área construida, cultivos y pastizales) para evidenciar la relación entre la expansión urbana y la fragmentación del paisaje. Se pudo constatar que en las áreas de mayor superficie construida se presenta la fragmentación de varias clases, sin embargo, las mismas

varían de acuerdo con las características de cada territorio, es decir no se identifica un único patrón, sin embargo, se observa una predominancia en la fragmentación de áreas forestales en la media luna.

Figura 5. Fraccionamiento del Paisaje por área Construida de la RMSC (2017 - 2023)



Fuente: preparado por los autores, 2024

Para evidenciar los resultados de la fragmentación, se han seleccionado dos casos diferentes a partir de los hexágonos con mayor incremento de superficie construida. El hexágono A, ubicado en el municipio de Warnes, muestra un territorio con fragmentación diversa de las clases Cultivos, Forestal y área Construida.

A través del análisis multitemporal a partir de imágenes satelitales, se pudo evidenciar que en los años 80 el polígono se caracterizaba por presentar un paisaje agrícola, y a partir de la entrada en funcionamiento comercial del Aeropuerto Internacional de Viru-Viru (1983), inicia un proceso de urbanización a lo largo de la carretera Santa-Cruz – Warnes (al Oeste del polígono), desde el 2005 se visualiza un alto incremento de loteamientos (apertura de vías de tierra y marcado de lotes) concentrados por urbanizaciones, el 2008 ya se muestra una alta cantidad de construcciones (viviendas) en las urbanizaciones, entre los años 2011 al 2016 se



evidencia una alta expansión y consolidación urbana, desde el año 2017 se muestra otra ola de expansión urbana, al lado Este del polígono, en directa relación con la construcción de la doble vía Santa Cruz-Warnes, fraccionando el paisaje, incrementando los parches de cultivos en aproximadamente 50% (respecto al total de incrementos por clase), y los parches forestales en un 40% .

En el caso del Hexágono B, ubicado entre los municipios de Cotoca y Santa Cruz de la Sierra, se observa como único incremento en la clase forestal en un 100%, estos debido a la disminución de número de parches de las otras clases en el periodo de estudio (2017-2023), es decir los mismos has sido absorbidos en su mayoría por la clase área construida, debido al proceso de conurbación entre Santa Cruz de la Sierra y Cotoca.

Del análisis con imágenes de satélite, podemos indicar que en década de los 80 presentaba un paisaje agrícola y forestal, con un asentamiento humano de características rurales (Cotoca), y pequeñas viviendas dispersas a lo largo de la carretera Santa Cruz-Cotoca, sin mayores cambios hasta el año 2000, donde se visualizan la extensión de urbanizaciones desde la ciudad de Santa Cruz de la Sierra (sector Pampa de la Isla), desde el 2010, se visualiza la expansión del área urbana de Cotoca, a partir de la habilitación de una vía de circunvalación, que ha promovido la urbanización al norte de esta área urbana (fuera del anillo), el 2016 se apertura una vía en la parte central del polígono, la cual parte de la carretera principal, en forma perpendicular y se dirige al Norte del polígono, impulsando la urbanización del sector norte, que se fue consolidando al año 2023, fraccionando parches de la clase forestal y sustituyendo el uso agrícola por el uso urbano, es decir que los parches de cultivo y otros van desapareciendo por la consolidación urbana en el sector.

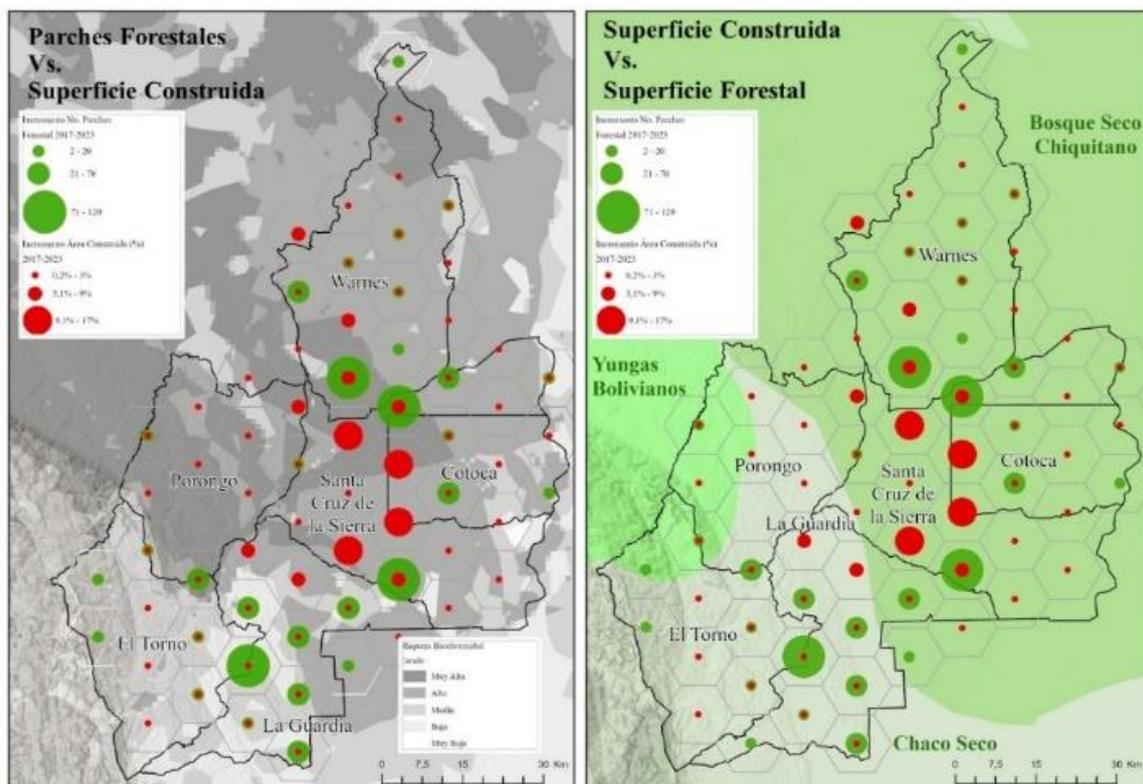
Por otro lado, de las ecorregiones que son parte de la RMSC, la ecoregión de Bosque Chiquitano es la más extensa y la más afectada por la fragmentación y la expansión urbana, y considerando que esta ecoregión presenta en su origen, paisajes abiertos con vegetación herbácea dominante, árboles dispersos, topografía plana a ondulada y suelos fértiles, además de fauna rica en herbívoros, aves y reptiles, cuenta con varias amenazas, entre las principales están: la contaminación, explotación de la vida silvestre, expansión agrícola, quemadas, sobrepastoreo, además de la urbanización (JICA, 2017), será necesario proteger y conservar las áreas forestales que aún permanecen dentro de la Región Metropolitana de Santa Cruz.

La ecorregión del Chaco Seco o Gran Chaco, que está ocupado principalmente con pastizales y bosques espinosos, presenta en el área de estudio un paisaje predominantemente ondulado, cubierto por área forestal, sin embargo, en el sector sur de la RMSC, presenta una amenaza hacia estos bosques por el incremento de la superficie de cultivos, siguiendo una tendencia de expansión agrícola provenientes del sudeste (municipio Cabezas), donde sus paisajes están constituidos en su mayoría por cultivos de soja, que se han incrementado, considerando la demanda del mercado, unida con las innovaciones tales como cultivos genéticamente modificados y otros cambios tecnológicos (JICA, 2017). En lo que concierne a la superficie del área construida, esta ha tenido un mayor crecimiento en el sector Norte del Municipio de La Guardia, en concordancia con el avance de la mancha urbana proveniente desde Santa Cruz de la Sierra (Figura 6).



La ecorregión de Yungas Bolivianas (Áreas rurales del Oeste de Porongo y El Torno) se encuentra en rangos de altitud que van aproximadamente de 400 a 1600 msnm. En el paisaje forestal que es amenazada por el chaqueo, la conversión agrícola, intensificada por la construcción de carreteras y la colonización (JICA, 2017), como se puede visualizar, existe un ligero incremento de la superficie de la clase área construida, pero además el incremento de parches de la clase forestal, por el cambio de uso, por lo cual, deberán tomarse medidas de protección de estos bosques, considerando que forman parte del Parque Nacional Amboró y se convierten una gran reserva forestal para la RMSC.

Figura 6. Afectaciones con Fraccionamiento del Paisaje por área Construida de la RMSC



Fuente: preparado por los autores, 2024

De acuerdo con el Mapa de grados de riqueza de Biodiversidad de la RMSC (figura 6), se ha presentado un alto incremento de la superficie de área construida en áreas de muy alta y alta biodiversidad, presentes entre los municipios de Santa Cruz de la Sierra, Warnes, Cotoca y Porongo, así mismo, presentan una alta fragmentación de tipo forestal en su interior, que implica una pérdida de biodiversidad de especies endémicas entre fauna y flora.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Una característica de la presente investigación es el uso de productos cartográficos previamente clasificados y calibrados, siguiendo una misma metodología para la identificación de usos de suelo de manera anual desde la el año 2017, que además fueron calculados utilizando imágenes con una resolución media (10 metros) que se ajusta a la escala de trabajo urbano-regional, requerida en la presente investigación, y que se encuentra disponible a partir de licencias abiertas a los usuarios. Esto facilitó el análisis a nivel intraurbano, para la identificación y cuantificación de objetos geográficos (parches), que dieron precisión al estudio, pudiendo comprobar esto en la contrastación de los resultados, donde se utilizaron imágenes de alta resolución. Una limitación del estudio ha sido la temporalidad de estos datos, ya que el más antiguo es de 2017, lo cual dificultó la apreciación de la magnitud de fragmentación que se dio en la RMSC en un periodo previo al 2017, sin embargo, permitieron constatar procesos de consolidación, donde se presentaban casos de fusión o eliminación de parches.

Respecto al uso de la herramienta FRAGSTATS, se tuvo dificultades en su uso a escalas menores de la municipal, por lo que se tuvo que utilizar la extensión PATCHANALYST, el cual cuenta con esta opción. Por tanto, se debe considerarse una buena capacidad de procesamiento de los equipos informáticos utilizados para el procesamiento de métricas a mayor escala.

Por otra parte, el uso de una grilla con superficies homogéneas ha permitido tener una mejor aproximación a la problemática del estudio, permitiendo visualizar la distribución espacial de los procesos de fragmentación, además que esta herramienta puede permitir la priorización de estrategias de gestión del territorio. Así mismo la herramienta GEODA, que ayudó en el cálculo del índice de autocorrelación espacial LISA, permite identificar áreas donde se concentran los fenómenos, sin embargo, debido a la dimensión y complejidad del área de estudio (cantidad de variables y diversidad de territorios), no se pudieron identificar altos valores de correlación entre las distintas variables de la fragmentación espacial.

La fragmentación a nivel de paisaje nos muestra una evolución general en la cantidad de parches, pero a esta escala, se invisibiliza el nivel de fraccionamiento diverso que se tiene al interior de la RMSC. El análisis temporal a nivel de clase y desagregado por municipios, facilita el desarrollo de políticas específicas para cada gobierno local, considerando el incremento o la disminución de cada clase, pero también será importante, analizar estos comportamientos desde una visión metropolitana que reflexione el aporte de cada clase para el global metropolitano.

La fragmentación a nivel de Clase, permite especificar las clases más fraccionadas e identificar la unidad político administrativa que corresponde, es la que proporciona un amplio panorama para la caracterización de la fragmentación, identificando el incremento o decremento de superficies, parches y distancia entre parches. Sin embargo, esta escala aún es insuficiente para explicar fenómenos intraurbanos, por ello se requiere utilizar una forma geométrica homogénea menor, que permita desagregar la información para facilitar el análisis y focalizar los sectores



de la RMSC donde se presenta la fragmentación del territorio con mayor intensidad; razón por la cual se define utilizar la malla homogénea hexagonal de 100 km<sup>2</sup> sobrepuesta a la RMSC, a partir de la cual se recalculan los indicadores de fragmentación del paisaje.

La expansión urbana ha reducido las áreas forestales, y en consecuencia, ha reducido también la riqueza en biodiversidad, principalmente en los municipios de Santa Cruz de la Sierra, Warnes y Cotoca; sin embargo en el municipio de La Guardia se presenta una alta afectación a la superficie forestal con fragmentación, debido a la expansión de la frontera agrícola, es decir que los bosques se están fragmentando tanto por la urbanización, como por el incremento de áreas de cultivo, pero también existen casos de incremento de fraccionamiento en pastizales, concentrados en el municipio de Porongo y la Guardia, que implica que el fraccionamiento en bosques se ha dado en etapas previas.

Realizado el análisis de la variación temporal de uso de suelo, se ha identificado que existe un patrón recurrente de ocupación urbana en la RMSC, el primero, se da a partir de la habilitación de un vía principal, se presentan asentamientos humanos dispersos a lo largo de la vía y se van habilitando suelos para cultivo (primer fraccionamiento de áreas forestales), en etapas posteriores, de acuerdo a la demanda, el suelo pasa a ser fraccionado en urbanizaciones y lotes que son ofertados a través de inmobiliarias, los cuales constituyen nuevos parches de suelo desnudo (en un periodo corto), pero que pasan rápidamente (por las condiciones del entorno) a ser considerados como pastizales, y finalmente una etapa siguiente es la de consolidación, donde se incrementan las edificaciones y ocupación de los manzanos, en consecuencia, incrementa el tamaño promedio del parche del área construida y por lo general se reducen los parches de cultivos y áreas forestales. En este contexto, es importante reconocer que los pastizales son áreas en proceso de transformación, que pueden aportar tanto a suelo agrícola, pero principalmente a suelo urbano, por lo que se sugiere profundizar los estudios de esta categoría de suelo, analizado comportamientos y temporalidades.

En el estudio se visualiza una alta dinámica en el cambio de usos de suelo, con una alta presión a las áreas forestales, produciendo la reducción de espacios de conectividad que permitan la circulación de las especies que aún habitan en la RMSC, principalmente en sectores cercanos a ríos y riachuelos, por lo tanto, son necesarias medidas de resguardo de corredores biológicos que permitan su sobrevivencia, según el tipo de especie, para lo cual la planificación urbana y metropolitana debe incluir medidas de mitigación en estos sectores.

Mediante el estudio realizado, se logra el objetivo de analizar y caracterizar la evolución de la fragmentación del paisaje natural de la Región Metropolitana de Santa Cruz, a partir de la expansión urbana, en el periodo 2017-2023. Por otra parte, se verifica la hipótesis planteada para el estudio, evidenciando que la expansión urbana dispersa provoca la fragmentación del paisaje natural, en este caso, visualizamos con los ejemplos de los hexágonos A y B, detallados en el capítulo anterior, además de identificar el incremento de 8.263 Ha. de área construida (64% de todo el crecimiento del área construida) y 413 parches de la clase forestal (40% del total de parches



incrementados), disminuyendo 224 Ha en áreas de muy alta riqueza en biodiversidad, entre el periodo 2017-2023.

Finalmente, el incremento de la superficie en la clase área construida y el fraccionamiento de los distintos usos de suelo de su entorno en el periodo 2017-2023, demuestran que la mancha urbana de la RMSC se encuentra en consonancia con el modelo de ciudad dispersa, caracterizado por la baja densidad, la discontinuidad y fragmentación de usos del suelo en el territorio. Por lo tanto, el empleo de métricas de ecología del paisaje se ha demostrado útil para la determinación de las características espaciales de los cambios a diferentes escalas, principalmente la desagregación a grilla hexagonal.

## REFERENCIAS

ALVES, G. et al. **Distribución espacial del empleo formal en la ciudad autónoma de Buenos Aires: un diagnóstico a partir de registros administrativos.** 1 dez. 2018.

BARROS, M. P. DE. Métricas da paisagem como ferramenta de avaliação dos efeitos da urbanização na estrutura da paisagem: o caso de Cuiabá, Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 411–432, 12 dez. 2018.

BIRCH, C. P. D.; OOM, S. P.; BEECHAM, J. A. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. **Ecological Modelling**, v. 206, n. 3–4, p. 347–359, 24 ago. 2007.

CAMELO, E.; CASTRO, D. E.; FERREIRA, N. C. Diagnóstico do Padrão de Paisagem com Métricas dos Remanescentes de Vegetação em Goiânia. **Revista Habitus - Revista do Instituto Goiano de Pré-História e Antropologia**, v. 7, n. 1, p. 229–247, 3 abr. 2012.

DÁVILA, A.; ALATORRE, L. C.; BRAVO-PEÑA, L. C. Análisis de la evolución espacio-temporal del uso de suelo urbano en la metrópolis de Chihuahua. *Economía, sociedad y territorio*, v. 21, n. 65, p. 1–27, 1 jan. 2021.

FUENZALIDA, T. et al. **Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones.** Em: [s.l: s.n.]. p. 1–213.

GALOPPO, E. **Introducción a los paisajes Antrópicos de Bolivia.** La Paz: Instituto de Investigaciones Geograficas, 2017.

GOBIERNO AUTÓNOMO DEPARTAMENTAL DE SANTA CRUZ. **Diagnostico Región Metropolitana de Santa Cruz.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/333103043\\_Diagnostico\\_Region\\_Metropolitana\\_de\\_Santa\\_Cruz](https://www.researchgate.net/publication/333103043_Diagnostico_Region_Metropolitana_de_Santa_Cruz)>. Acesso em: 12 abr. 2024.



INE. 1,7 millones de habitantes existirán en Santa Cruz de la Sierra en 2020. [s.l: s.n.]. JICA. **Proyecto de Plan Maestro para la Mejora del Transporte del Área Metropolitana de Santa Cruz.** [s.l: s.n.]. Acesso em: 13 abr. 2024.

JOSSE, C. et al. Desarrollo de insumos para la toma de decisiones de conservación en la cuenca amazónica occidental. **Ecología Aplicada**, v. 12, n. 1, p. 45–65, 2013.

KARRA, K. et al. Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning. 2021. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. **Anais...2021.**

MCGARIGAL, K.; ENE, E. FRAGSTATS v4: **Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps.** , 2023. Disponível em: <<https://www.fragstats.org/index.php/license>>. Acesso em: 14 abr. 2024

OLSON, D. M. et al. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. **BioScience**, v. 51, n. 11, p. 933–938, 2001.

ONILUDE, O. O.; VAZ, E. **Data Analysis of Land Use Change and Urban and Rural Impacts in Lagos State**, Nigeria. 2020.

PEREIRA DOS SANTOS, C. A. Landscape fragmentation in the Rio Preto Basin (BHRP) - Cerrado Bahian. **Fronteiras**, v. 9, n. 1, p. 256–272, 5 mar. 2020.

PINTO, J. **Ecología del paisaje en el municipio de San Julián departamento de Santa Cruz** – Bolivia. Santa Cruz: [s.n.].

ROJAS, C. et al. **Efectos de la urbanización sobre la conectividad ecológica de paisajes metropolitanos.** [s.l.] Departamento de Geografía Universidad Nacional del Sur, 2017. v. 26

SADIGOV, R. Rapid Growth of the World Population and Its Socioeconomic Results. **The Scientific World Journal**, United States, v. 2022, p. 8110229, 2022.

SETO, K. C.; FRAGKIAS, M.; GÜNERALP, B.; REILLY, M. K. A meta-analysis of global urban land expansion. **Plos one**, United States, v. 6, n. 8, p. e23777, 2011.

ZAMBRANO, L. et al. Landscape spatial patterns in Mexico City and New York City: contrasting territories for biodiversity planning. **Landscape Ecology**, v. 37, n. 2, p. 601–617, 1 fev. 2022.



## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado con el apoyo del “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico” (CNPq), del “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil” (CAPES) y de la “Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico” (FUNCAP). Agradecemos el apoyo recibido.