

VARIABILIDAD ESPACIAL Y ESTACIONAL DE LA VEGETACIÓN: ESTUDIO EN EL BARRIO CENTRO DE SANTIAGO DEL ESTERO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES¹

María Eugenia Arias

Doctora en Ciencias Aplicadas, Mención Ambiente y Salud. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales (IGEHCS). Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina.

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1592-2230>

Correo electrónico: me.arias@conicet.gov.ar

Juan Pablo Celemín

Doctor en Geografía. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Instituto de Geografía, Historia y Ciencias Sociales (IGEHCS). Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina.

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8917-8061>

Correo electrónico: jpcelemín@conicet.gov.ar

1 El artículo se basa en una parte de los resultados de la tesis doctoral de Arias (2024).

Recebido em: 12/04/2025 Aprovado em: 04/09/2025
DOI: <https://doi.org/10.5380/guaju.v1i1.99230>



Resumen

La densificación urbana evita la expansión rural, pero suele disminuir la presencia de espacios verdes en las ciudades, por lo que evaluar la vegetación urbana es crucial por sus servicios ecosistémicos. Una manera de medir su estado es a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). En este estudio, se utilizó la plataforma Google Earth Engine (GEE) para procesar la gran cantidad de información disponible del indicador y evaluar su variabilidad en el barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero a partir de imágenes Sentinel 2 en el período 2019-2023. Los datos de NDVI fueron relacionados con los registros de precipitaciones para determinar si existe alguna correlación entre las lluvias y la evolución del NDVI. Posteriormente, los valores se agregaron a nivel de radio censal para estudiar la variabilidad interna del indicador en el barrio. Los resultados indicaron una disminución del NDVI a lo largo del tiempo, con una baja correlación con las precipitaciones. El análisis territorial por radios censales mostró valores más bajos en el centro y noreste del barrio, y valores más altos en el sur. Por último, se proponen medidas para mejorar e incrementar la vegetación en el área estudiada.

Palabras Clave: pérdida de cobertura vegetal; NDVI; Google Earth Engine; Santiago del Estero; crecimiento y densificación urbana.

Spatial and seasonal variability of vegetation. Study in the Santiago del Estero downtown neighborhood from satellite images

Abstract

Urban densification prevents rural expansion, but it usually reduces the presence of green spaces in cities, so evaluating urban vegetation is crucial for its ecosystem services. One way to measure its status is through the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). In this study, the Google Earth Engine (GEE) platform was used to process the large amount of information available from the indicator and evaluate its variability in the Centro neighborhood of the city of Santiago del Estero from Sentinel 2 images in the period 2019- 2023. The NDVI data were related to rainfall records to determine if there is any correlation between rainfall and the evolution of NDVI. Subsequently, the values were aggregated at the census radius level to study the internal variability of the indicator in the neighborhood. The results indicated a decrease in NDVI over time, with a low correlation with rainfall. The territorial analysis by census radius showed lower values in the center and northeast of the neighborhood, and higher values in the south. Finally, measures are proposed to improve and increase vegetation in the studied area.

Keywords: loss of vegetation cover; NDVI; Google Earth Engine; Santiago del Estero; urban growth and densification.



Variabilidade espacial e sazonal da vegetação. Estudo no bairro Centro de Santiago del Estero a partir de imagens de satélite

Resumo

A densificação urbana evita a expansão rural, e geralmente diminui a presença de espaços verdes nas cidades, portanto, avaliar a vegetação urbana é crucial devido aos seus serviços ecossistêmicos. Uma maneira de medir seu estado é através do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). Neste estudo, a plataforma Google Earth Engine (GEE) foi utilizada para processar a grande quantidade de informações disponíveis do indicador e avaliar sua variabilidade no bairro Centro da cidade de Santiago del Estero a partir de imagens Sentinel 2 no período de 2019-2023. Os dados de NDVI foram relacionados com os registros de precipitações para determinar se existe alguma correlação entre as chuvas e a evolução do NDVI. Posteriormente, os valores foram agregados a nível de raio censitário para estudar a variabilidade interna do indicador no bairro. Os resultados indicaram uma diminuição do NDVI ao longo do tempo, com baixa correlação com a precipitação. A análise territorial por raios censitários mostrou valores mais baixos no centro e nordeste do bairro, e valores mais altos no sul. Por último, propõem-se medidas para melhorar e aumentar a vegetação na área estudada.

Palavras-chave: perda de cobertura vegetal; NDVI; Google Earth Engine; Santiago del Estero; crescimento e densificação urbana.



1. INTRODUCCIÓN

La rápida expansión urbana es un factor importante que contribuye al cambio ambiental en muchas partes del mundo. América Latina y el Caribe constituyen la región más urbanizada del mundo en desarrollo y se caracteriza por un crecimiento acelerado (DA CUNHA; VIGNOLI, 2009). Uno de los principales procesos que conformaron las ciudades latinoamericanas es la migración de la población del campo a la ciudad, un fenómeno que ha producido desequilibrios regionales en la mayoría de los países de la región (VARGAS-BOLAÑOS et al., 2020). En consecuencia, las ciudades latinoamericanas no solo tienen un alto nivel de urbanización, sino también un proceso de creación de nuevas áreas urbanas, muchas veces sin planificación. Este fenómeno tiene un gran impacto en el ambiente, en la economía local y reduce la calidad de vida (MONTERO; GARCÍA, 2017). Si bien el crecimiento urbano se considera necesario para una economía sostenible, la expansión urbana puede generar muchos problemas, incluida la pérdida de espacios abiertos, daños al paisaje, contaminación ambiental, congestión del tráfico, entre otros (NOLÈ et al., 2013). Consiguientemente, en esta región, la urbanización es uno de los principales factores que conducen a la disminución de las superficies verdes y a la sustitución de los edificios tradicionales (BERKOWITZ et al., 2003). En este contexto, la vegetación urbana adquiere un papel relevante como indicador clave del desarrollo sostenible, al brindar funciones ecológicas, sociales y económicas que ayudan a equilibrar el crecimiento urbano con la preservación del ambiente. La investigación analiza la evolución espacio-temporal de la cobertura vegetal en la ciudad de Santiago del Estero mediante tecnologías geoespaciales avanzadas, generando información esencial para comprender la dinámica de los espacios verdes, promover una planificación urbana sostenible y respaldar decisiones orientadas a mejorar la calidad de vida y fortalecer la resiliencia ambiental en entornos urbanos.

En América Latina existe un modelo híbrido de crecimiento donde prácticamente ha desaparecido la vivienda unifamiliar en las zonas residenciales de los estratos medios y altos, y ha sido reemplazada por edificios que sustituyen las viviendas en los antiguos barrios residenciales, aumentando la densificación. Por su parte, los estratos bajos que no logran acceder al mercado formal de vivienda se localizan en las periferias más lejanas, en loteos de urbanización informal donde construyen viviendas progresivamente. En este contexto, las zonas centrales de las ciudades se han ido condensando con gran fuerza, atrayendo al sector terciario y generando, al mismo tiempo, una zona de actividad comercial y de servicios, además de la construcción de edificios de viviendas (FERRO, 2001). Así, mientras, se densifican las zonas centrales, también crecen los barrios unifamiliares en la periferia en

un proceso que no necesariamente ocurre de manera planificada.

La densificación es una respuesta apropiada al rápido crecimiento cuyo objetivo es limitar la expansión de los asentamientos en tierras agrícolas y paisajes naturales periurbanos mediante la creación de espacio adicional en áreas ya construidas (SORENSEN et al., 2016). Puede ser considerado como una oportunidad para el desarrollo sostenible ya que mejora la eficiencia de los recursos y el transporte. Además, permite la preservación de los terrenos no urbanizados fuera de las ciudades, los cuales pueden destinarse a usos como la agricultura sostenible, la preservación de la biodiversidad o la recreación al aire libre (EMILSSON; SANG, 2017). Las ciudades que tienen una alta concentración de población y una alta densidad edilicia son una opción lógica para un mundo cada vez más urbanizado donde las preocupaciones sobre la sostenibilidad ambiental y la expansión urbana son primordiales (UN-HABITAT, 2012).

No obstante, no deja de tener efectos negativos ya que este proceso suele implicar la pérdida de espacios verdes y el uso de cemento u otros materiales similares para crear estructuras sólidas o fijar elementos en su lugar. La cementación impacta negativamente en el entorno urbano, al disminuir la capacidad de infiltración del agua en el suelo, incrementar el riesgo de inundaciones y ocasionar la pérdida de hábitats naturales. El exceso de cemento puede agravar la isla de calor urbana, donde las áreas urbanas se calientan considerablemente más que sus alrededores debido a la absorción y retención de calor por parte de las superficies impermeables. El efecto de los procesos urbanizadores sobre los ecosistemas naturales y sobre la calidad del hábitat es un tema de estudio de actualidad ya que el crecimiento demográfico y edilicio es determinante en el descenso de la cobertura vegetal. Un trabajo a escala global enfocado en la cobertura vegetal urbana (RICHARDS; BELCHER, 2019) demuestra como disminuyó en la mayoría de las áreas urbanas entre 2000 y 2015, principalmente en los países menos desarrollados, por el contrario, la cobertura vegetal proporcional aumentó en algunas áreas urbanas en el este de América del Norte y partes de Europa de la mano de la planificación urbana. Un ejemplo a escala local es el caso de la ciudad de Santiago del Estero, donde se ha evidenciado la relación entre el proceso de densificación urbana y la pérdida de cobertura vegetal, medida a través del NDVI, utilizando la herramienta Google Earth Engine (CELEMIN; ARIAS, 2022). El uso de su extenso catálogo de imágenes satelitales permite monitorear la evolución de la vegetación casi en tiempo real, lo que convierte la integración de tecnologías geoespaciales de última generación en un recurso fundamental para el desarrollo sostenible, al brindar información precisa y actualizada para la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la formulación de políticas que promuevan ciudades más resilientes y ambientalmente equilibradas.

En este contexto, el uso de indicadores ambientales como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se vuelve clave para evaluar la salud y el crecimiento de la vegetación en entornos urbanos (ROUSE et al., 1974). Si bien el NDVI se ha utilizado ampliamente en la evaluación de la vegetación en áreas rurales, también es útil en áreas urbanas. En los últimos años, ha habido un interés creciente en el uso del NDVI a escala urbana (HUANG et al., 2017; PEACE; NWAGBARA, 2019; ARYAL et al., 2022; entre otros) a partir de la aparición de satélites de alta resolución espacial. La evaluación del estado de la vegetación en ciudades es importante porque las plantas (árboles, arbustos, palmeras, hierbas) proporcionan beneficios importantes para la población residente en las urbes, dado que la vegetación en áreas urbanas provee una amplia gama de beneficios, como la regulación de la temperatura, la reducción del ruido, la mejora de la calidad del aire y la retención del agua. Además, la vegetación presente en las ciudades puede mejorar la calidad de vida de los habitantes y generar efectos positivos en la salud humana (psicológicos y/o fisiológicos) (NOWAK; DWYER, 2007). Sin embargo, la presencia de vegetación urbana puede verse afectada por una serie de factores, como es el crecimiento poblacional o la densificación. Es por ello que, el estudio temporal de la estacionalidad del NDVI a escala urbana es esencial para evaluar el estado de la vegetación en ciudades y comprender cómo se puede relacionar con otros factores urbanísticos (GUHA; GOVIL, 2022; YANG et al., 2017).

Los estudios temporales del NDVI a escala urbana implican la recopilación y el análisis de datos a lo largo del tiempo. Estos datos se utilizan para estudiar la variabilidad temporal de la vegetación en un área urbana determinada. Las investigaciones cronológicas del NDVI pueden ser útiles para evaluar el crecimiento y la salud de la vegetación urbana a lo largo de las estaciones y los años. Por lo tanto, tales análisis pueden ayudar a identificar los períodos de mayor crecimiento de la flora urbana (TUCKER, 1979).

Asimismo, el examen temporal y estacional del NDVI a escala urbana es importante para la gestión y el diseño urbano (HU et al., 2020). Los datos del NDVI pueden ser utilizados por los planificadores urbanos para comprender cómo la vegetación afecta el clima y la calidad del aire en una ciudad. Además, los datos de este indicador pueden ser utilizados para identificar las áreas que requieren una mayor inversión en infraestructura verde y mejorar la eficacia de la gestión de la vegetación en entornos urbanos.

El seguimiento del cambio de la cobertura del suelo urbano, en particular el de la vegetación, a través de la interpretación de imágenes de satélite, puede ser una herramienta extremadamente valiosa para los planificadores urbanos en la detección de los efectos del

cambio ambiental (HUANG et al., 2017). En la actualidad existen numerosas plataformas satelitales que registran información terrestre, diseminadas en diferentes repositorios. Esto da lugar no solo a una amplia variedad de datos, sino que también hace imperativo manejar estos grandes volúmenes de datos de manera eficiente.

Los sensores Landsat han sido fundamentales para la observación de fenómenos geográficos, incluidos los peligros naturales, y cambios en la superficie de la tierra ocasionados por el desarrollo humano (LI; ROY, 2017). Debido a los altos volúmenes de datos capturados y archivados regularmente y a la tecnología actual disponible los cambios en el uso de la tierra ahora se pueden medir no solo en dos instantáneas de tiempo, sino de manera continua a lo largo de muchos intervalos de tiempo (JIANYA et al., 2008). El análisis de series de tiempo de los cambios en la cobertura de la tierra y la vegetación permite a los investigadores comprender las tendencias generales y la dinámica de los cambios en el uso de la tierra a lo largo de series de tiempo completas en lugar de un simple aumento o disminución entre dos puntos en el tiempo. El modelado de los cambios en el uso de la tierra, como por ejemplo las tasas de crecimiento de la vegetación, se puede realizar con mayor precisión utilizando una serie de tiempo proporcionada por imágenes de satélite (TROMBETTI et al., 2008).

El procesamiento de grandes conjuntos de datos de series de tiempo se ha hecho accesible gracias a los avances tecnológicos recientes en la computación, en particular la creación de Google Earth Engine (GEE). En este contexto, el acceso a datos históricos y actuales de detección remota por medio de la tecnología geoespacial de GEE, representa una mejora significativa para monitorear y evaluar el cambio de uso de la tierra a lo largo del tiempo (ZURQANI et al., 2019). El mapeo del uso y la cobertura del suelo, así como la identificación de la ubicación de la infraestructura verde mediante GEE, resultan cruciales para una planificación urbana eficaz, el desarrollo sostenible y la conservación del ambiente en un contexto de rápido crecimiento urbano. El considerable impacto ambiental de las ciudades ha sido una preocupación constante para las iniciativas orientadas al desarrollo sostenible. Además, se prevé que los efectos del cambio climático, como sequías, inundaciones, incendios forestales y pandemias, se intensifiquen durante el próximo siglo, incluso si se logra reducir las emisiones (HASAN et al., 2025).

En este marco, el propósito del presente trabajo es establecer la variación temporal del NDVI, así como su variabilidad espacial, mediante el uso de la plataforma GEE, que permite procesar un gran volumen de información. El estudio constituye un análisis de caso aplicado al barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero, utilizando imágenes Sentinel-2 correspondientes al período 2019-2023. La herramienta es fundamental en investigaciones urbanas para el

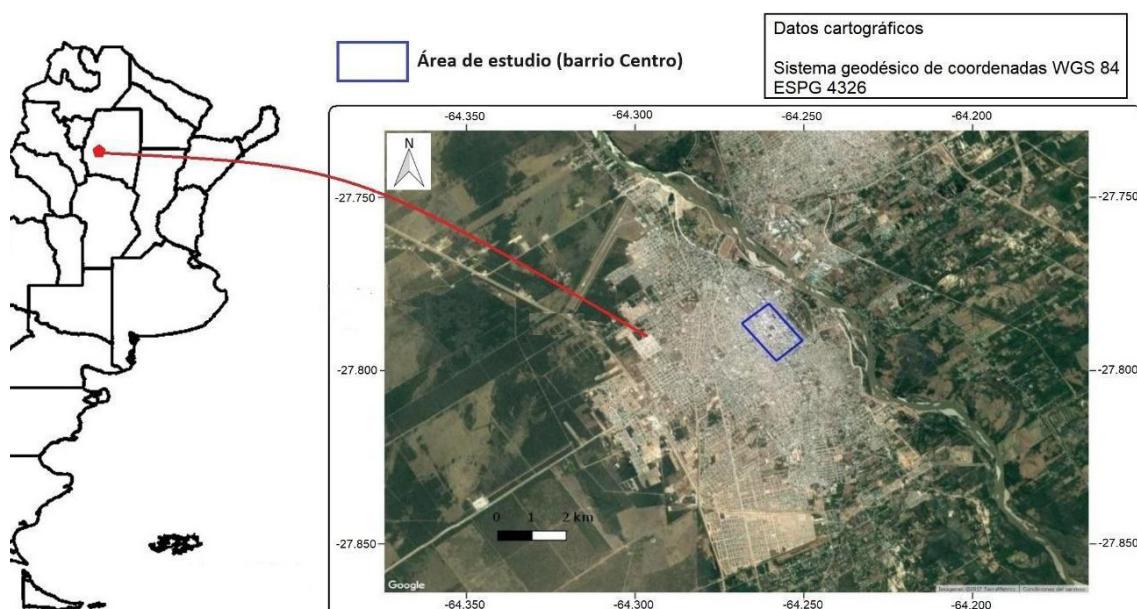
desarrollo sostenible, al analizar la evolución temporal de la vegetación, detectar tendencias de pérdida o recuperación asociadas a procesos como la densificación y apoyar la planificación de intervenciones. Ofrece datos objetivos que facilitan la toma de decisiones, el diseño de estrategias sostenibles y la inclusión de criterios ambientales en políticas públicas. Además, permite calcular indicadores como el NDVI, clave para evaluar el estado de la vegetación, mejorar la calidad ambiental y fortalecer la resiliencia climática urbana (CHEN et al., 2021). Diversos trabajos han utilizado GEE para estudios de vegetación a escala urbana (VEGA et al., 2019; CELEMIN; ARIAS, 2022, 2023, 2024). Del mismo modo, los datos de NDVI fueron contrastados con los registros de precipitaciones provenientes del aeropuerto de la ciudad, con el fin de determinar si las lluvias tienen algún grado de correlación con la evolución temporal del NDVI.

2. METODOLOGIA

Área de estudio

La ciudad de Santiago del Estero es capital de la provincia homónima en el norte de Argentina y cabecera del departamento Juan Francisco Borges. Está situada entre 27°47'04"S y 64°16'01"O, sobre la margen derecha del río Dulce, a una altitud de 182 m s.n.m (FIGURA 1).

Figura 1 - Localización de la ciudad de Santiago del Estero y del barrio central, Argentina

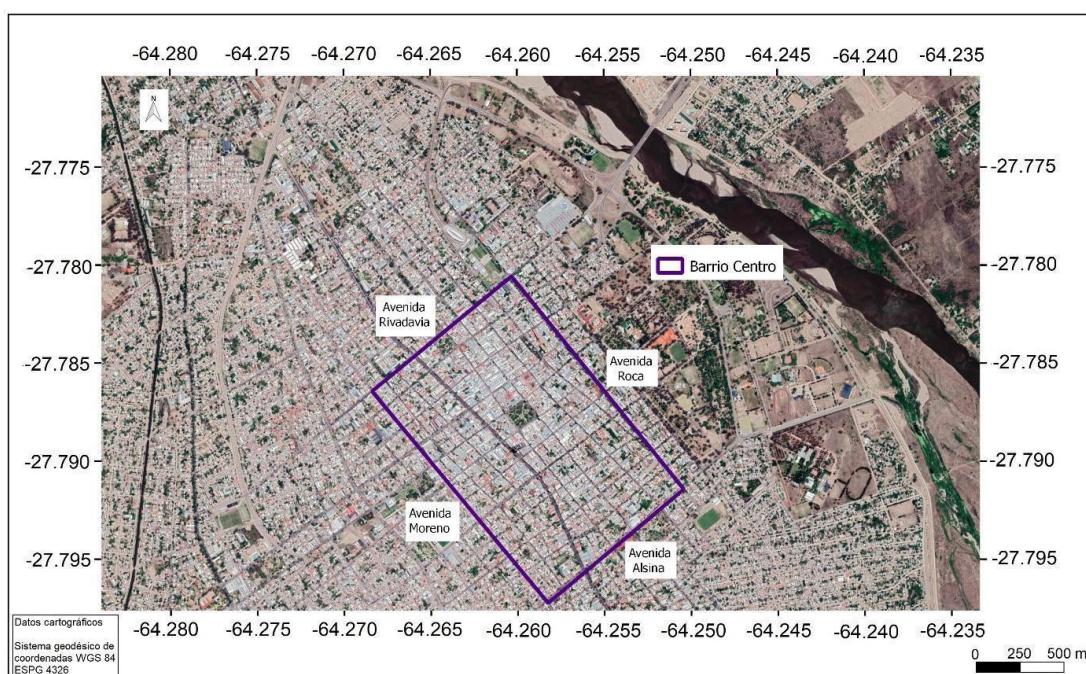


Fuente: Elaborado por los autores en base a cartografía e imágenes satelitales, 2023.

Santiago del Estero tiene una superficie de 2.116 km² (1,5% del total provincial). Es la décima ciudad más grande del país y está ubicada a 1.043 kilómetros al nor-noroeste de Buenos Aires. La mayor parte de la población se concentra en esta ciudad, que representa el centro administrativo, financiero y comercial de la provincia. Santiago del Estero se ubica en una zona de transición entre los climas templados pampeanos y los climas subtropicales de la región chaqueña y según la clasificación de Köppen presenta un clima semiárido cálido (BSh). En base a datos de la estación meteorológica local, ubicada en la periferia de la ciudad de Santiago del Estero a (27° 46' latitud Sud), (64° 18' longitud Oeste) y a 190 m s.n.m., la precipitación media anual es de 550 mm, las temperaturas medias de los meses de enero y julio son de 27,7 °C y 13,3 °C, respectivamente, mientras que las temperaturas máxima y mínima absolutas son de 47 °C y -10 °C. Hay ocurrencia de heladas entre los meses de mayo y agosto. Los vientos son dominantes del Norte en verano y del Sur en invierno (BOLETTA et al., 1993).

Dentro de la citada ciudad, se tomó como unidad de estudio al barrio Centro. El mismo se localiza en la parte central de la ciudad de Santiago del Estero y está delimitado por las avenidas Rivadavia, Moreno, Alsina y Roca (FIGURA 2). Abarca un perímetro de 5,10 km y una superficie de 1,55 km². En cuanto a la infraestructura gris, en esta zona central de la ciudad se observan edificios de viviendas que de a poco sustituyen a la vivienda unifamiliar propia de los barrios residenciales.

Figura 2 - Localización del barrio Centro en la ciudad de Santiago del Estero



Fuente: Elaborado por los autores en base a imágenes de Google Earth Pro, 2023.

Uso de Imágenes Sentinel 2 en GEE

El Sentinel 2 es una misión de observación terrestre desarrollada por la Agencia Espacial Europea enmarcada dentro del programa Copérnico para desarrollar observaciones del planeta Tierra y aportar servicios como el seguimiento de los cambios del uso de suelo y la gestión de los desastres naturales por medio de dos satélites: Sentinel 2A y Sentinel 2B. Ambos poseen una resolución temporal destacable ya que, a diferencia de otros satélites como el Landsat 8 OLI/TIRS, la misión pasa por un mismo punto de la superficie terrestre cada 5 días. Además, posee una resolución espacial interesante de 10 m, 20 m o 60 m dependiendo de la banda. Todo el procesamiento de datos se realizó utilizando la tecnología de computación en la nube en la plataforma GEE (<https://earthengine.google.org/>). Para ello se elaboró un script para obtener el valor general de NDVI para el área de estudio para todas las imágenes disponibles con un máximo de 1% de cobertura de nubes en el período 2019-2023. Además, se realizó un análisis estacional con las imágenes agrupadas mensualmente de la siguiente manera: enero-marzo (verano); abril-junio (otoño); julio-septiembre (invierno) y octubre-diciembre (primavera). Posteriormente, todos los datos obtenidos fueron promediados para elaborar la cartografía síntesis para conocer la variabilidad interna del NDVI en el barrio Centro. En total se procesaron 120 imágenes sin nubes en el período en consideración para obtener el NDVI. Cabe mencionar que el satélite comenzó a aportar imágenes de la zona de estudio a fines del año 2018, de manera que el período temporal y estacional no puede ser más largo, por lo que este estudio es de carácter inicial y exploratorio. Asimismo, es importante destacar que en este caso se trabajó con el catálogo que posee las imágenes corregidas atmosféricamente (Level-2A).

La forma en que se puede establecer la cantidad y estado de la vegetación es a través del uso de imágenes satelitales que permiten obtener diferentes índices, entre los que se destaca el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI-) que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Donde IRC es la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano (banda 8 del Sentinel 2) y R es la reflectividad en la banda del rojo (banda 4 del Sentinel 2). El rango de valores del índice está delimitado por el rango -1 y 1 y cuánto más cercano está a 1 mayor es la presencia de vegetación saludable en un lugar. Por su parte, los registros de precipitaciones del período considerado fueron extraídos del sitio web del Servicio Meteorológico Nacional (<https://www.smn.gob.ar/>) que posee datos meteorológicos históricos del aeropuerto de la

ciudad de Santiago del Estero.

Para conocer su variabilidad interna, se recurrió al programa QGIS versión 3.22.5 Białowieża “long term release” (GNU General Public License, 2021) a los fines de mostrar el promedio temporal del NDVI para el área de estudio en el período en consideración a través de dos mapas síntesis: uno en formato raster y otro en formato vectorial (radio censal). Cada radio censal contiene 300 viviendas aproximadamente y es el nivel mayor de desagregación territorial disponible. El uso de radios censales permite identificar con más precisión las áreas con mayor o menor presencia de vegetación (NDVI), lo que representa una herramienta valiosa para la gestión urbana local y la planificación de intervenciones orientadas a mejorar la cobertura vegetal en el futuro. La selección del radio censal se debe a dos motivos. El primero es que es fácilmente compatible con los datos socioeconómicos y ambientales relevados por los censos de población, viviendas y hogares por lo que permite integrar el valor del NDVI con otros indicadores. En particular, se considera lo establecido por el indicador 11.7.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, referido al acceso de mujeres, niños, personas mayores y personas con discapacidad a espacios verdes y públicos seguros, inclusivos y accesibles. El segundo motivo radica en que los radios están delimitados por calles fácilmente reconocibles por las autoridades municipales, por lo que resulta útil para la gestión territorial local, con un nivel de desagregación espacial mayor que los tradicionales barrios.

3. RESULTADOS²

Análisis de la variabilidad temporal (estacionalidad)

El estudio del NDVI agrupado por estación para todo el período en consideración (FIGURA 3) muestra que durante el verano (enero-marzo) la tendencia del NDVI es decreciente a medida que se acerca al otoño. Asimismo, se registra una correlación media entre ambas variables (NDVI y Tiempo) con un R² de 0,77. El análisis realizado para la estación arrojó un valor promedio de NDVI de 0,10.

En el otoño (abril-junio) se observa un comportamiento similar a la estación anterior ya que la época muestra una tendencia decreciente a medida que se aproxima al invierno. También existe una correlación media entre ambas variables con un R² de 0,67. El análisis muestra un valor promedio de NDVI de 0,09.

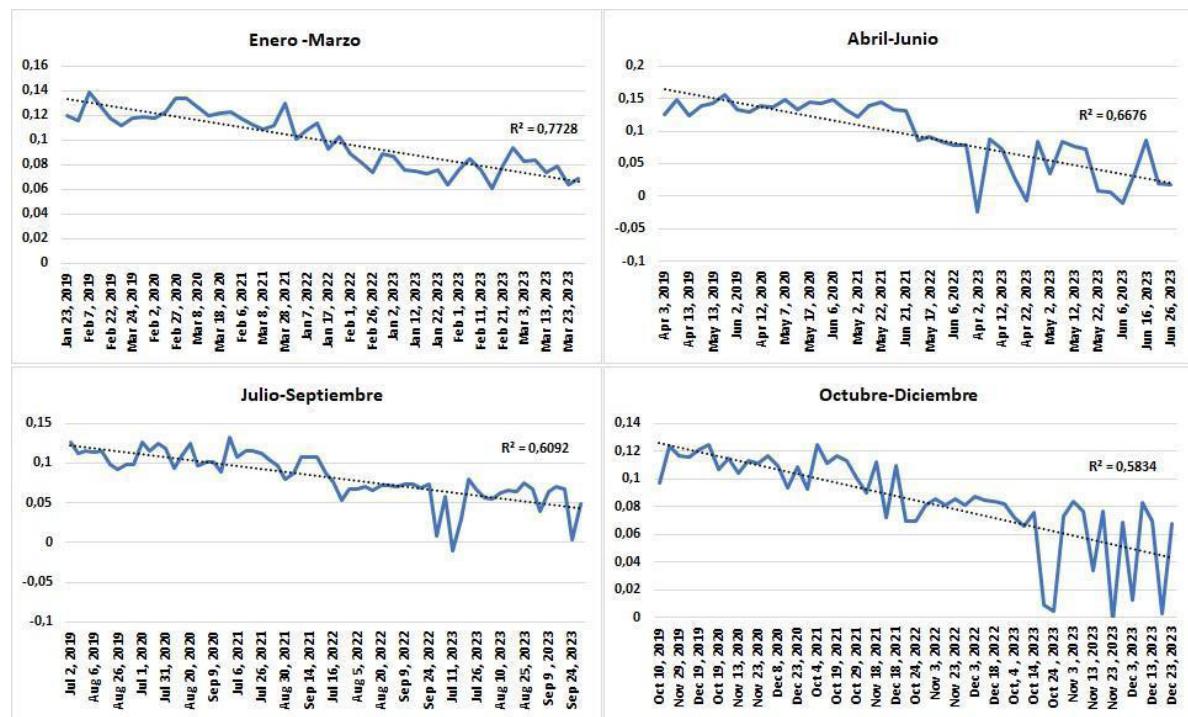
² El artículo se basa en los resultados de la tesis doctoral de Arias (2024).

El comportamiento de la estación invernal (julio-septiembre) no difiere de las dos anteriores, con un NDVI decreciente en el tiempo y una correlación media entre ambas variables: R2 de 0,61. También se puede mostrar que en septiembre el indicador aumenta de manera esperable a medida que se aproxima la primavera. A partir del análisis se obtuvo un valor promedio de NDVI de 0,08.

La primavera (octubre-diciembre) continúa con la tendencia decreciente observada en las estaciones anteriores. La correlación es media con un R2 de 0,58. El análisis realizado para la estación arrojó un valor promedio de NDVI de 0,08, al igual que la estación anterior.

Es relevante señalar la irregularidad del indicador durante las estaciones de otoño (a partir de abril de 2023), invierno (septiembre de 2022 y julio de 2023), y primavera (a partir de octubre de 2023).

Figura 3 - Evolución del NDVI en cada estación del año durante el período 2019-2023 para el barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero

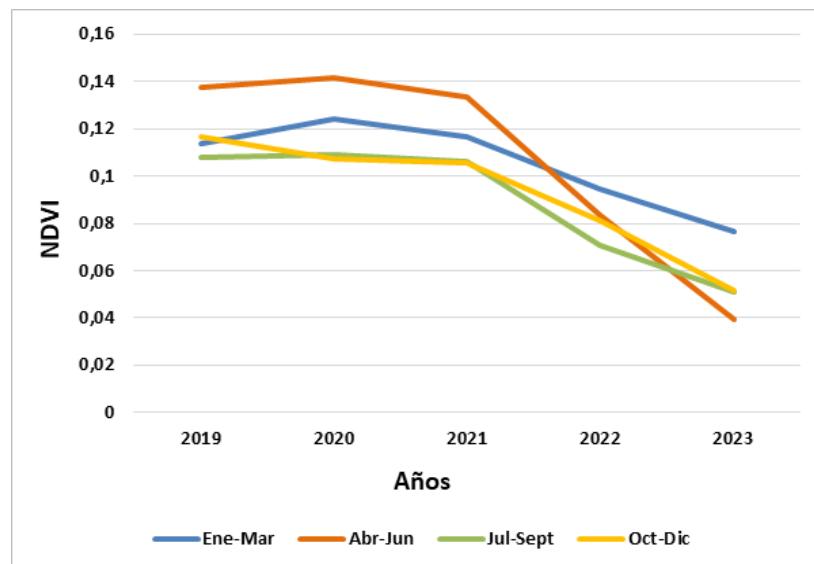


Fuente: Elaborado por los autores, 2024.

Las estaciones agrupadas por año también muestran la tendencia decreciente del NDVI (FIGURA 4), particularmente a partir del año 2021.

A partir de los valores de NDVI obtenidos en el análisis estacional, se observa la evolución del indicador en el área de estudio; sin embargo, dado que el registro está disponible desde hace pocos años, no es posible extraer conclusiones definitivas.

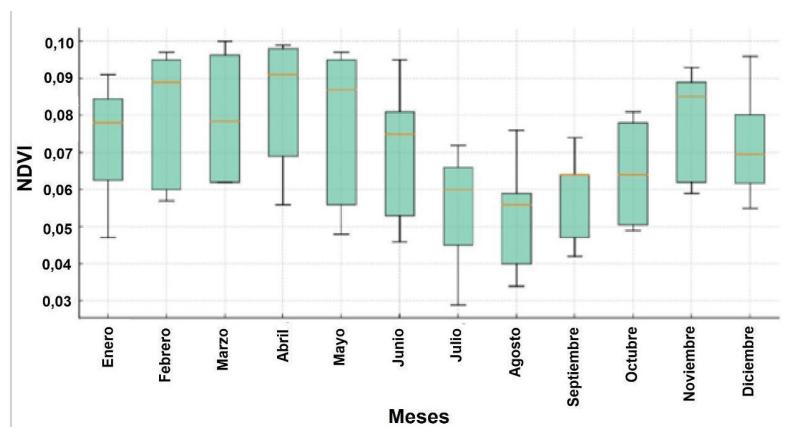
Figura 4 - Evolución estacional del NDVI para los años en el período 2019-2023 para el barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero



Fuente: Elaborado por los autores, 2024.

Por último, el resultado del análisis mensual de las imágenes producidas en el período 2019 – 2023 (FIGURA 5) muestra como el NDVI tiene un incremento paulatino desde el mes de enero hasta mayo para luego descender en el invierno y aumentar levemente en la primavera.

Figura 5 - Promedio mensual del NDVI en el período 2019-2023



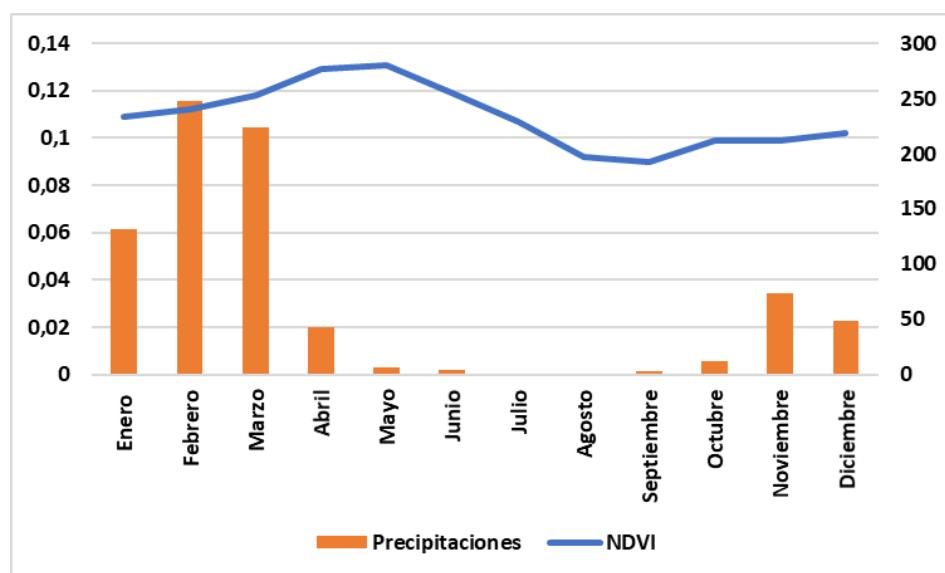
Fuente: Elaborado por los autores, 2024.

Relación NDVI – Precipitaciones

Las precipitaciones muestran una tendencia decreciente durante el período considerado, con los siguientes valores: 274 mm en 2019, 176 mm en 2020, 144 mm en 2021, 157 mm en 2022 y 136 mm en 2023. Se puede mencionar que los años analizados son pocos para establecer una tendencia definitiva, dado que el catálogo de imágenes del satélite Sentinel está disponible desde hace relativamente poco tiempo. Cabe señalar que los valores bajos obtenidos son esperables para una zona de clima semiárido.

Existe una baja correlación entre las variables NDVI y precipitaciones para cada uno de los meses promediados del período 2019-2023 con $R^2=0,10$ y cuya variabilidad mensual puede ser vista en el siguiente gráfico (FIGURA 6):

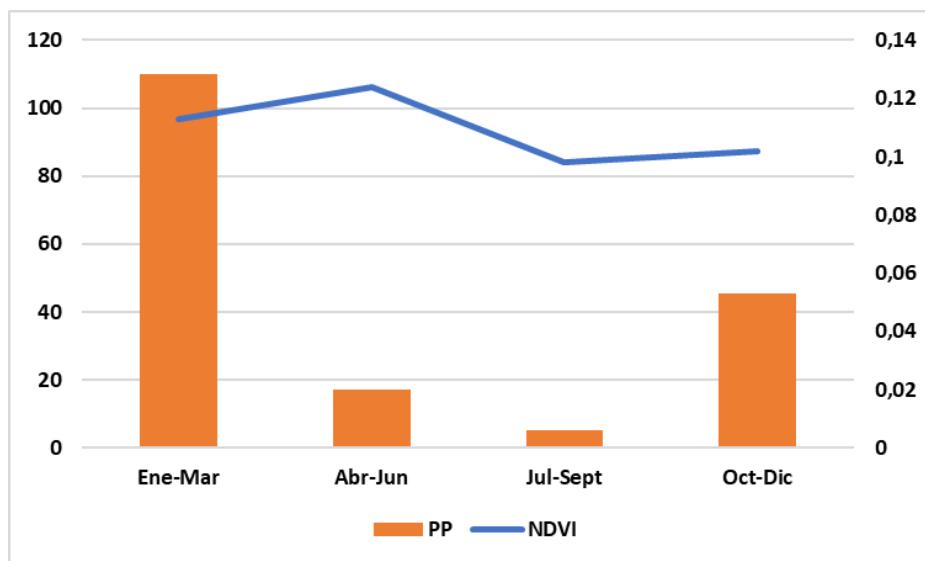
Figura 6 - Valores mensuales medios de NDVI y precipitaciones en el período 2019-2023



Fuente: Elaborado por los autores, 2024.

La aplicación del mismo procedimiento para cada estación del año del período considerado también muestra una baja correlación $R^2 = 0,124$, tal como se puede visualizar en el gráfico correspondiente (FIGURA 7):

Figura 7 - Valores estacionales medios de NDVI y precipitaciones en el período 2019-2023.

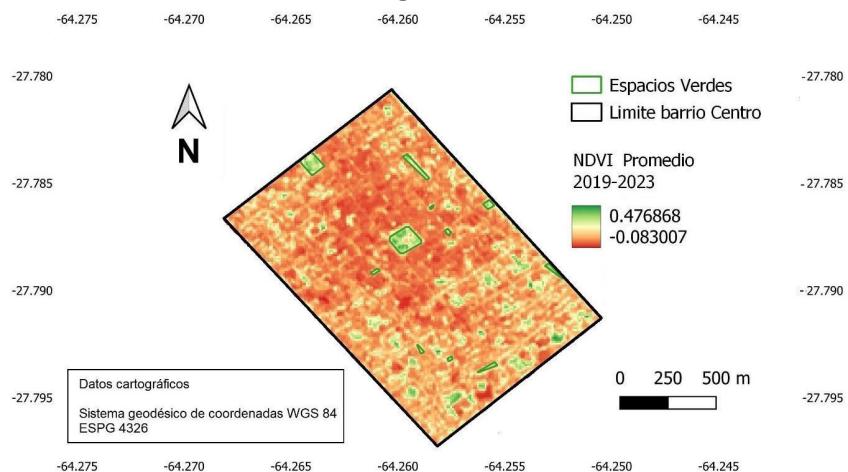


Fuente: Elaborado por los autores, 2024.

Variabilidad espacial del NDVI en el barrio Centro en el período 2019-2023

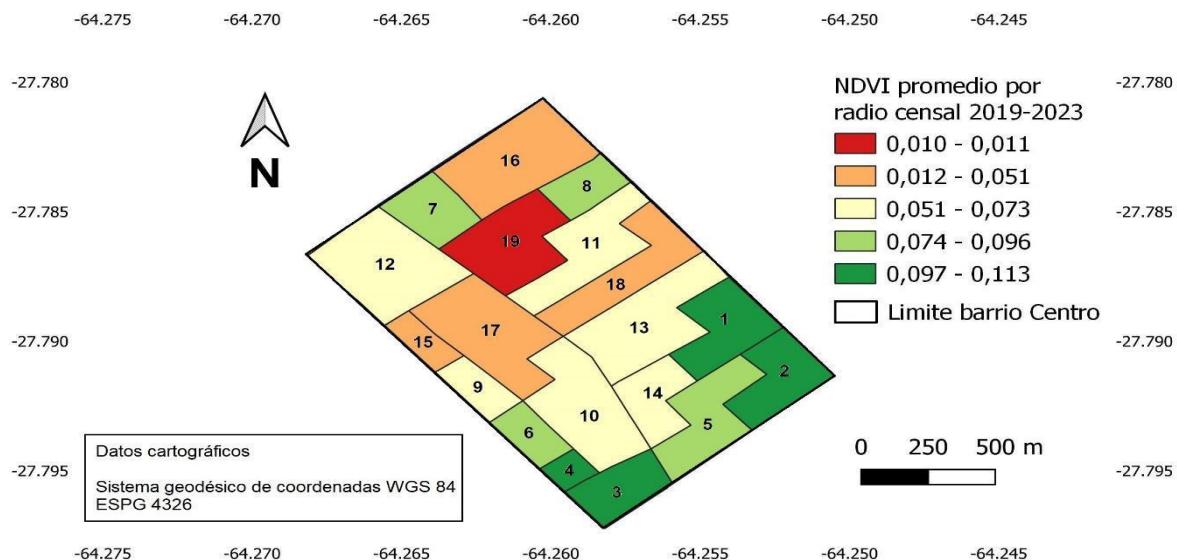
Los mapas síntesis que se muestran a continuación son de utilidad ya que limitan la variabilidad estacional del indicador, y de cualquier factor atmosférico o del satélite que podría arrojar resultados anómalos al promediar los valores de todas las imágenes obtenidas y procesadas tanto a nivel de pixel (formato ráster) (FIGURA 8) como para cada radio censal del barrio, indicándose además el ranking de NDVI de mayor a menor en el mismo mapa (FIGURA 9).

Figura 8 - NDVI promedio del período 2019 – 2023 en el barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero



Fuente: Elaborado por los autores, 2024.

Figura 9 - Valores medios y ranking de NDVI de los radios censales del barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero en el período 2019 – 2023



Fuente: Elaborado por los autores, 2024.

Ambos muestran cómo se distribuye el indicador en la zona de estudio a lo largo del lapso temporal considerado, con valores más altos en el sudeste y sudoeste, y más bajos en el centro y noreste (FIGURA 10). El primer mapa permite reconocer como los valores altos del NDVI son coincidentes con las plazas principales del área de estudio, y otros valores altos con la mitad inferior del barrio asociados a mayor cobertura arbórea. El segundo mapa, con los valores promediados a nivel de los radios censales, en cambio, permite elaborar un ranking del indicador (de más alto al más bajo), de manera que se puede establecer un orden de prioridad por zonas para mejorar la presencia de vegetación en las distintas partes del barrio. En el mapa se pueden reconocer los valores más altos para el indicador en la zona sur del barrio, mientras que el centro y noreste poseen los valores más bajos. Es decir, esta cartografía permite visualizar la variabilidad espacial del NDVI promedio por radio censal dentro del barrio, con el objetivo de detectar las áreas con menor cobertura vegetal, identificar aquellas que requieren mayor atención y tomar medidas para mejorar la presencia de vegetación.

Figura 10 – Sectores del barrio Centro con valores extremos de NDVI: plazoleta 27 de abril (A) y plaza San Martín (B), con mayor cantidad de individuos arbóreos; C) y calle Mitre, en el área central del barrio Centro, con escasa presencia de árboles y predominio de superficies de cemento.



Fuente: Archivo fotográfico de Arias, 22/02/2024

4 DISCUSIÓN

Pérdida de cobertura vegetal en las ciudades

Las ciudades latinoamericanas presentan un alto nivel de urbanización y formación de nuevas áreas urbanas, donde la pérdida de cobertura vegetal afecta negativamente la sustentabilidad urbana. Por ello, el planeamiento urbanístico debe ser relevante en promover la creación de áreas verdes u otros espacios públicos aptos para recibir vegetación, además de la creación de estructuras urbanas basadas en normas que promuevan el cultivo y mantenimiento de la vegetación en los espacios privados (DE LA BARRERA; HENRÍQUEZ, 2017).

El presente estudio se enfocó en analizar la evolución temporal y la variabilidad del NDVI para el barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero por medio del uso de imágenes Sentinel 2. Los resultados evidencian que, si bien los valores de NDVI varían según la estación del año, se observa un descenso sostenido de la vegetación en todas ellas durante el período analizado, en un contexto de creciente densificación del área de estudio en las últimas décadas. En relación con ello, es pertinente mencionar el estudio realizado por Celemín y Arias (2022), quienes examinaron la relación entre la densificación urbana y la pérdida de vegetación mediante el análisis conjunto del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y del Índice Urbano (IU), a partir de series temporales correspondientes al período 1992-2011. Sus hallazgos revelaron una tendencia decreciente del NDVI en paralelo con un aumento sostenido del IU, lo que evidencia una expansión del tejido urbano acompañada por una pérdida progresiva de cobertura vegetal. En el contexto de la densificación del área central de la ciudad de Santiago del Estero, estos resultados refuerzan la hipótesis de que el avance de los procesos urbanos está asociado a una disminución significativa en la presencia de vegetación.

Además, en la investigación no se tuvo en consideración la Evapotranspiración (ET), debido a que los datos no están disponibles, el cual es un factor importante que podría influir en los valores de NDVI. Cabe mencionar que el fenómeno de la evapotranspiración más precisamente el proceso de transpiración está influido por factores de orden fisiológico asociados a las distintas especies vegetales, como su etapa de desarrollo, profundidad de las raíces o capacidad para disponer del agua en el suelo (SÁNCHEZ MARTÍNEZ, 2000; ESQUIVEL et al., 2019). Al respecto, según un censo de arbolado de alineación realizado en el área de estudio (ARIAS; CELEMIN, 2021), existe una heterogeneidad de especies de plantas siendo en su mayoría exóticas y unas pocas nativas, con una mayor dominancia numérica de las especies *Citrus aurantium* y *Handroanthus impetiginosus*. Es importante destacar que la permanencia del follaje en una planta es un aspecto a considerar, ya que influye en la cobertura vegetal. En este caso, las especies dominantes varían, siendo una perenne y la otra caducifolia. Asimismo, el tipo de especies vegetales, puede influir en este indicador a través de sus propiedades de reflectancia espectral, densidad, cobertura, ciclos de crecimiento y adaptación a las condiciones ambientales. Por lo tanto, para interpretar los valores de NDVI sería necesario tener en cuenta la ecología de la vegetación.

A futuro, se puede integrar otro indicador a partir de imágenes vinculado a la construcción -Normalized Difference Built-up Index (NDBI)- para también conocer su evolución temporal. Lamentablemente Sentinel 2 carece de banda térmica, por lo que no se lo puede vincular a la isla de calor urbana. Para ello sería necesario recurrir a satélites de la serie Landsat 8 y 9, aunque estos tienen una resolución temporal y espacial menor (16 días y 30 m respectivamente).

Es importante mencionar que la mayoría de los estudios que exploran la relación entre la vegetación y las precipitaciones se han realizado a escala regional. Un ejemplo de este enfoque es el trabajo de Kumari et al. (2021) donde utilizaron Google Earth Engine para analizar el NDVI y las precipitaciones a lo largo de un período de 20 años, examinando su evolución tanto temporal como espacial. Sin embargo, la investigación a escala urbana es escasa en comparación. Algunos de los pocos estudios recientes se centran en regiones áridas, como es el caso de las investigaciones realizadas por Mohammed Ali et al. (2019) y Nejatian et al. (2022) en las ciudades de Baghdad (Irak) y Mashhad (Irán). Esta disparidad en la cantidad de estudios entre las escalas de análisis puede atribuirse a la menor presencia de vegetación en entornos urbanos, a las limitaciones en la resolución de los sensores remotos y al mayor interés en investigar la relación entre la isla de calor urbana y la temperatura en las ciudades.

La urbanización que no tiene en cuenta la relación con el entorno natural supone una amenaza para la calidad del entorno urbano y, por tanto, para la calidad de vida de sus habitantes. Se sabe que el desarrollo de espacios hechos por el hombre y el reemplazo de superficies y formas naturales en las ciudades es un factor importante del cambio climático local (FERRELLI et al., 2018).

Los resultados obtenidos fueron similares a los registrados en estudios en otras partes del país, aunque están focalizados en ciudades enteras y no en barrios específicos. Por ejemplo, en varias ciudades de la región de Cuyo (Argentina), el trabajo de Arboit y Maglione (2018) mostró que el crecimiento de la población fue un factor en la disminución del NDVI, mientras que en Bahía Blanca se observa una disminución del NDVI en una serie de tiempo de 26 años (FERRELLI et al., 2016). Por otro lado, un estudio (PAOLINI et al., 2016) en doce ciudades del norte argentino (la parte más pobre del país), muestra que la dinámica de crecimiento en esta parte del país se debe a patrones de expansión más que a la densificación (aunque ambos procesos coexisten en mayor o menor medida), por lo que apartan la idea de expansión urbana como el principal factor que afecta a la vegetación y apoyan la hipótesis de los bajos valores de vegetación por la disminución del balance hídrico.

A nivel de América Latina, Palacios Vega et al. (2019) registraron una pérdida significativa de cobertura vegetal al calcular el NDVI del área urbana de la ciudad de Iquitos (Perú) para el período 1999-2009. Otro caso reciente es en la ciudad de Medellín, donde se analiza el período de 1986 a 2016 que indicó que las áreas más densas de la ciudad experimentaron la mayor pérdida de vegetación (SOTO-ESTRADA, 2019). Por su parte, De Carvalho y Szlafsztein (2019) obtuvieron resultados parecidos para un estudio de caso de la localidad de Belém (Brasil) utilizando imágenes Landsat 5 TM de 1986 a 2009.

Frente a este contexto, la plataforma Google Earth Engine (GEE) constituye una herramienta valiosa para monitorear la evolución de la vegetación urbana mediante imágenes Sentinel de alta resolución. Su uso permite identificar con precisión zonas críticas de pérdida de cobertura vegetal y planificar intervenciones orientadas a su recuperación. La expansión urbana y la consiguiente reducción de áreas verdes hacen imprescindible implementar medidas de manejo que garanticen su preservación, dado que la Organización Mundial de la Salud reconoce estos entornos como esenciales para mejorar la calidad de vida, fortalecer la resiliencia local y promover estilos de vida sostenibles. Asimismo, investigaciones recientes incorporan inteligencia artificial para identificar y gestionar dichos espacios, contribuyendo a la salud urbana y la sostenibilidad. Finalmente, el uso de GEE favorece el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU para 2030, al facilitar el monitoreo global de los espacios verdes urbanos (OMS, 2017; CHEN et al., 2021; HASAN et al., 2025).

Medidas para mejorar la presencia de vegetación en la zona de estudio

A partir del ranking de NDVI para los radios censales del barrio Centro se puede establecer cuáles requieren atención más urgente para suplir la carencia de vegetación por medio de estrategias de gestión ambiental urbana. La mejora de la cobertura vegetal en zonas densamente pobladas de las ciudades es una preocupación importante debido a los múltiples beneficios que aporta. La vegetación en las urbes ayuda a reducir la contaminación del aire, aumentar la calidad del agua, reducir el efecto isla de calor controlando así el clima urbano y contribuye a mejorar la salud y el bienestar de los residentes urbanos. Para lograr una mayor cobertura vegetal en estas áreas, es necesario adoptar estrategias integrales que aborden los diferentes aspectos que influyen en la planificación y el mantenimiento de espacios verdes en entornos urbanos.

Para ello, el uso de herramientas de análisis espacial como Google Earth Engine (GEE) permite evaluar y monitorear la cobertura vegetal en áreas urbanas, identificando sectores con déficit de espacios verdes y priorizando intervenciones para su recuperación (KUANG et al., 2021). En el caso del barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero, esta plataforma facilita el seguimiento periódico de la vegetación, facilitando el diseño de estrategias de manejo adaptadas a las condiciones locales y orientadas a fortalecer la infraestructura verde. Así, el GEE es un recurso esencial para la planificación urbana sostenible, al ofrecer datos precisos y actualizados que apoyan decisiones para mejorar el ambiente y el bienestar de la población en áreas urbanas.

Una de las estrategias clave es el diseño de espacios verdes multifuncionales que satisfagan las necesidades de la comunidad, desde la recreación y la educación hasta la conservación y la mitigación del clima. Los espacios verdes pueden ser parques, jardines comunitarios, huertos urbanos, áreas verdes en los patios escolares y otras áreas vegetadas que se adapten a las necesidades locales. Asimismo, la plantación de árboles es una de las mejores formas de aumentar la cobertura vegetal en las ciudades. Por ello, es fundamental promover programas de forestación que prioricen el uso de especies nativas, resistentes a las condiciones urbanas y que aporten beneficios ambientales.

La tecnología también puede ser una herramienta valiosa para aumentar la cobertura vegetal en las ciudades. Las paredes y techos verdes pueden agregar vegetación en edificios y estructuras existentes, mientras que los sistemas de riego inteligentes y los sensores de humedad pueden mantener la vegetación saludable en áreas urbanas (MUTANI; TODESCHI, 2020; BEVILACQUA, 2021). La integración de la vegetación en la planificación urbana también es fundamental, lo que significa que se deben considerar las distintas especies de plantas en los planes de desarrollo urbano, las regulaciones de construcción y los códigos de zonificación (STURIALE; SCUDERI, 2019). Asimismo, los planificadores urbanos deben trabajar con los residentes y las organizaciones comunitarias para identificar áreas adecuadas para la vegetación y diseñar espacios verdes que sean accesibles y utilizables.

Finalmente, la educación y la participación ciudadana son elementos esenciales para el éxito de cualquier estrategia con fines de mejorar la cobertura vegetal en zonas densamente pobladas de las ciudades (TURNER-SKOFF; CAVENDER, 2019; YANG et al., 2019; CZAJA et al., 2020). Es fundamental educar a la comunidad sobre la importancia de la vegetación en las ciudades y cómo pueden contribuir a aumentar la cobertura vegetal en sus vecindarios a partir de programas de participación que busquen involucrar a los residentes en la creación y mantenimiento de espacios verdes en sus comunidades.

5 CONCLUSIÓN

Las ciudades latinoamericanas se encuentran entre las que tienen mayores tasas de urbanización de todo el mundo. Este proceso de urbanización ha llevado a una densificación y expansión simultáneas de la cobertura urbana, para dar cabida a una población en crecimiento. La ciudad de Santiago del Estero no es la excepción ya que ha incrementado significativamente su población en las últimas décadas. Para conocer el impacto de estos

procesos en la cobertura vegetal se recurrió a la plataforma Google Earth Engine y se procesaron todas las imágenes sin nubes de los dos satélites de la misión Sentinel 2 (período 2019-2023) para el barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero. Se observa tendencia decreciente del NDVI y una variabilidad del indicador en el interior de la zona de estudio. Al agrupar los valores a nivel de radio censal se pudo establecer un orden de prioridad para mejorar la presencia de vegetación, particularmente en la mitad centro-norte del barrio. Asimismo, se observa una baja correlación entre el indicador y las lluvias en el área de estudio.

Para mejorar la presencia de vegetación en una zona densamente poblada como es el barrio Centro de la ciudad de Santiago del Estero se necesita recurrir a medidas asociadas a la gestión ambiental urbana tales como el diseño de espacios verdes multifuncionales, promover la plantación de árboles con una participación activa de los vecinos, recurrir a soluciones basadas en la naturaleza como los techos verdes y muros vegetales, e integrar la vegetación en la planificación urbana.

Por último, es para destacar que herramientas como el GEE constituyen una forma novedosa para realizar este tipo de estudios temporales de forma continua, fácilmente actualizables y que producen gran cantidad de datos en forma de gráficos o mapas, lo que permiten obtener resultados más completos y precisos para detectar tendencias y cambios a largo plazo en el uso y la cobertura de la tierra. Además, su uso resulta fundamental para la elaboración de propuestas de planificación urbana que consideren formas de conservación de la vegetación en las ciudades, particularmente en las áreas más densas de las urbes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBOIT, M. E.; MAGLIONE, D. S. Análisis multitemporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas secos. Boletín de Estudios Geográficos, n. 109, p. 13-60, 2018. ISSN: 0374-6186. Disponible en <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/87643>.

ARIAS, M. E.; CELEMÍN, J. P. Distribución espacial del arbolado viario en el centro de la ciudad de Santiago del Estero (Argentina). Revista da Casa da Geografía de Sobral, v. 23, n. 3, p. 434-454, 2021. Doi: <https://doi.org/10.35701/rcgs.v23.811>

ARYAL, J.; SITAULA, C.; ARYAL, S. NDVI Threshold-Based Urban Green Space Mapping from Sentinel-2A at the Local Governmental Area (LGA) Level of Victoria, Australia. *Land*, v. 11, n. 3, p. 351, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/land11030351>.

BERKOWITZ, A. R.; NILON C. H.; HOLLWEG, K. S. Understanding urban ecosystems. A new frontier for science and education. New York: Springer, 2003.

BEVILACQUA, P. The effectiveness of green roofs in reducing building energy consumptions across different climates. A summary of literature results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 151, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111523>.

BOLETTA, P. E.; ACUÑA, L. R.; JUÁREZ DE MOYA, M. L. Análisis de las características climáticas de la Provincia de Santiago del Estero y comportamiento del tiempo durante la sequía de la campaña agrícola 1988/89. *Anuario (Argentina)*. Santiago del Estero, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1993.

CELEMIN, J. P.; ARIAS, M. E. Relationship between densification and NDVI loss: A study using the Google Earth Engine at local scale. *Environmental & Socio-economic Studies*, v. 10, n. 3, p. 33 – 42, 2022. Doi: <https://doi.org/10.2478/environ-2022-0015>.

CELEMIN, J. P.; ARIAS, M. E. Evolución de la cobertura vegetal y área construida en la ciudad de Mar del Plata (Argentina), en el periodo 2018-2022. *M+A. Revista Electrónica de Medio Ambiente*, v. 24, n. 1, p. 1-13, 2023. Disponible en <https://www.ucm.es/iuca/file/articulo-1-m-a-2023-1-resumen?ver>.

CELEMIN, J. P.; ARIAS, M. E. Evolución de la vegetación en la Reserva Forestal Bosque Peralta Ramos (2014-2024): Análisis con Google Earth Engine. *PLEAMAR Revista del Departamento de Geografía*, v. 4, n. 4, p. 59 – 73, 2024. Disponible en <http://fhmdp.edu.ar/revistas/index.php/pleamar/index>.

CHEN, Q.; ZHONG, C.; JING, C.; LI, Y.; CAO, B.; CHENG, Q. Mapeo rápido y evaluación dinámica anual de la calidad de los espacios verdes urbanos en Google Earth Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 10, n. 10, p. 670, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi10100670>.

CZAJA, M.; KOŁTON, A.; MURAS, P. The complex issue of urban trees—Stress factor accumulation and ecological service possibilities. *Forests*, v. 11, n. 9, p. 932, 2020. Doi: <https://doi.org/10.3390/forests11090932>.

doi.org/10.3390/f11090932.

DA CUNHA, J. M. P.; VIGNOLI, J. R. Crecimiento urbano y movilidad en América Latina. *Revista Latinoamericana de Población*, v. 3, n. 4-5, p. 27-64, 2009. Doi: <https://doi.org/10.31406/relap2009.v3.i1.n4-5.1>

DE CARVALHO, R. M.; SZLAFSZTEIN, C. F. Urban vegetation and ecosystem services: The influence on climate regulation and noise and air pollution. *Environmental Pollution*, v. 245, p. 844-852, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.114>.

DE LA BARRERA, F.; HENRÍQUEZ, C. Vegetation cover change in growing urban agglomerations in Chile. *Ecological Indicators*, v. 81, p. 265-273, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.067>.

EMILSSON, T.; SANG, Å. O. Impacts of Climate Change on Urban Areas and Nature- Based Solutions for Adaptation. En: KABISCH, N., KORN, H., STADLER, J., BONN A. (Eds.). *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*. Cham: Springer Nature International Publishing, 2017. p. 15–27. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>.

ESQUIVEL, J.; PAUCHARD, A.; SALDAÑA, A. Efecto de la diversidad funcional sobre la tasa de evapotranspiración: un análisis anual de tres bosques templados chilenos. *Gayana Botánica*, v. 76, n. 2, p. 156-167, 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432019000200156>.

FERRELLI, F.; BUSTOS, M. L.; PICCOLO, M. C. La expansión urbana y sus impactos sobre el clima y la sociedad de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Estudios Geográficos*, v. 77, n. 281, p. 469-489, 2016. Doi: <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201615>.

FERRELLI, F.; HUAMANTINCO CISNEROS, M. A.; DELGADO, A. L.; PICCOLO, M. C. Spatial and temporal analysis of the LST-NDVI relationship for the study of land cover changes and their contribution to urban planning in Monte Hermoso, Argentina. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, v. 64, n. 1, p. 25-47, 2018. Doi: <https://doi.org/10.5565/rev/dag.355>.

FERRO, J. S. ¿Expansión o Densificación?: Reflexiones en Torno al caso Bogotá. *Bitácora Urbano-Territorial*, v. 5, n. 1, p. 21-35, 2001. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4008411>.

GNU General Public License. QGIS Versión 3.22.5 Białowieża “long term release”. 2021.

Disponible en <https://qgisbialowieza.pl>.

GUHA, S.; GOVIL, H. Seasonal impact on the relationship between land surface temperature and normalized difference vegetation index in an urban landscape. *Geocarto International*, v. 37, n. 8, p. 2252-2272, 2022. Doi: [HTTP://DOI.ORG/10.1080/10106049.2020.1815867](https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1815867).

HASAN, M. M.; PRAMANIK, M.; ALAM, I.; KUMAR, A.; AVTAR, R.; ZHRAN, M. Assessing the efficacy of artificial intelligence based city-scale blue green infrastructure mapping using Google Earth Engine in the Bangkok metropolitan region. *Journal of Urban Management*, v. 14, n. 2, p. 434-450, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.11.009>.

HU, Y.; DAI, Z.; GULDMANN, J. M. Modeling the impact of 2D/3D urban indicators on the urban heat island over different seasons: A boosted regression tree approach. *Journal of environmental management*, v. 266, p. 110-424, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110424>.

HUANG, H.; CHEN, Y.; CLINTON, N.; WANG, J.; WANG, X.; LIU, C.; GONG, P.; YANG, J.; BAI, Y.; ZHENG, Y.; ZHU, Z. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 166-176, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.021>.

JIANYA, G.; HAIGANG, S.; GUORUI, M.; QIMING, Z. A Review of Multi-Temporal Remote Sensing Data Change Detection Algorithms. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 37 (Part B7), p. 757-762, 2008. Disponible en <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=84354307d8bea784e5772143f6676d9760b08e71>.

KUANG, W.; HOU, Y.; DOU, Y.; LU, D.; YANG, S. Mapping Global Urban Impervious Surface and Green Space Fractions Using Google Earth Engine. *Remote Sens*, v. 13, n. 20, p.41-87, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs13204187>.

KUMARI, N.; SRIVASTAVA, A.; DUMKA, U. C. A Long-Term Spatiotemporal Analysis of Vegetation Greenness over the Himalayan Region Using Google Earth Engine. *Climate*, v. 9, n. 7, p.109, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/cli9070109>

LI, J.; ROY, D. P. A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sensing*, v. 9, n. 9, p. 902, 2017.

Doi: <https://doi.org/10.3390/rs9090902>.

MOHAMMED ALI, A. K.; AL-RAMAH, F. K. M.; ABDUL-RAHMAN, B. A. Evaluation of impact of vegetation decrease on precipitation rates in Baghdad City using remote sensing technique. *Eco. Env. & Cons*, v. 25, p. 48-54, 2019. ISSN 0971-765X.

MONTERO, L.; GARCÍA, J. Panorama multidimensional del desarrollo urbano en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile: CEPAL, 2017.

MUTANI, G.; TODESCHI, V. Building energy modeling at neighborhood scale. *Energy Efficiency*, v. 13, n. 7, p. 1353-1386, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09882-4>.

NEJATIAN, A.; MAKIAN, M.; GHEIBI, M.; FATHOLLAHI-FARD, A. M. A novel viewpoint to the green city concept based on vegetation area changes and contributions to healthy days: a case study of Mashhad, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 702-710, 2022. Doi: <https://orcid.org/0000-0002-5939-9795>.

NOLÈ, G.; LASAPONARA, R.; MURGANTE, B. Applying Spatial Autocorrelation Techniques to Multi-Temporal Satellite Data for Measuring Urban Sprawl. *International Journal of Environmental Protection*, v. 3 n. 7, p. 11-21, 2013. Disponible en <https://iris.unibas.it/bitstream/11563/56840/1/IJEP10317-20130731-175641-5409-26545.pdf>.

NOWAK, D. J.; DWYER, J. F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In: KUSER, J.E (Ed.). *Urban and Community Forestry in the Northeast* Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. p. 25-46. Doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4289-8_2.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. *Urban green spaces: a brief for action*. World Health Organization. Regional Office for Europe, p. 22, 2017. <https://iris.who.int/handle/10665/344116>.

PALACIOS-VEGA, J. J.; ZÁRATE-GÓMEZ, R.; VELA, R. J. M.; BRAÑAS, M. M.; RIOS, J. E. B. Predicción de la pérdida de la cobertura vegetal por aumento de áreas urbanas en Iquitos, Perú. *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, v. 7, n. 1, p. 37-50, 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.22386/ca.v7i1.263>.

PAOLINI, L.; ARÁOZ, E.; GIOIA, A.; POWELL, P. A. Vegetation productivity trends in response to urban dynamics. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 17, p. 211-216, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.04.005>.

PEACE, N.; NWAGBARA, M. O. Assessment of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of Port Harcourt Metropolis and Environs, from 1986 to 2018: Implication to Urban Greening and Management. *Annals of Geographical Studies*, v. 2, n. 2, p. 25-34, 2019.

RICHARDS, D. R.; BELCHER, R. N. Global changes in urban vegetation cover. *Remote Sensing*, v. 12, n. 1, p. 23, 2019. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs12010023>.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoreo de sistemas de vegetación en las Grandes Llanuras con ERTS. *Publicación especial de la NASA*, v. 351, p. 309, 1974.

SÁNCHEZ MARTÍNEZ, M. I. Características y apreciaciones generales de los métodos de medida y estimación de la evapotranspiración. *Revista de Geografía Norte Grande*, n. 27, p. 27-36, 2000. Disponible en <https://repositorio.uc.cl/server/api/core/bitstreams/2d98c816-beb4-4f6b-8e87-07d3244480b7/content>

SORENSEN, J.; PERSSON, A.; STERNNUDD, C.; ASPEGREN, H.; NILSSON, J.; NORDSTRÖM, J.; JÖNSSON, K.; MOTTAGHI, M.; BECKER, P.; PILESJÖ, P.; LARSSON, R.; BERNDTSSON, R.; MOBINI, S. Re-thinking urban flood management—Time for a regime shift. *Water*, v. 8, n. 8, p. 332, 2016. Doi: <https://doi.org/10.3390/w8080332>.

SOTO-ESTRADA, E. Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia. *Revista internacional de contaminación ambiental*, v. 35, n. 2, p. 421-434, 2019. Doi: <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.13>.

STURIALE, L.; SCUDERI, A. The role of green infrastructures in urban planning for climate change adaptation. *Climate*, v. 7, n. 10, p. 119, 2019. Doi: <https://doi.org/10.3390/cli7100119>.

TROMBETTI, M.; RIANO, D.; RUBIO, M. A.; CHENG, Y. B.; USTIN, S. L. Multi-temporal vegetation canopy water content retrieval and interpretation using artificial neural networks for the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 1, p. 203–215, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.013>.

TUCKER, C. J. Combinaciones lineales de rojo e infrarrojo fotográfico para el monitoreo de la vegetación. *Teledetección del medio ambiente*, v. 8, p. 127-150, 1979.

TURNER-SKOFF, J. B.; CAVENDER, N. The benefits of trees for livable and sustainable communities. *Plants, People, Planet*, v. 1, n. 4, p. 323-335, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1002/ppp3.39>.

UN – HABITAT (United Nations Human Settlements Programme). Leveraging Density: Urban Patterns for a Green Economy. Nairobi: UN Habitat, 2012.

VARGAS-BOLAÑOS, C.; OROZCO-MONTOYA, R.; VARGAS-HERNÁNDEZ, A.; AGUILAR-ARIAS, J. Methodology for determining the growth of the urban sprawl in the capitals of the Central American region (1975–1995–2014). *Revista Geográfica de América Central*, v. 64, p. 41–74, 2020. Doi: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.64-1.3>.

VEGA J. J. P.; ZÁRATE-GÓMEZ R.; VELA R. J. M.; BRAÑAS M. M.; RIOS J. E. B. Predicción de la pérdida de la cobertura vegetal por aumento de áreas urbanas en Iquitos, Perú. *Ciencia amazónica (Iquitos)*, v. 7, n. 1, p. 37–50, 2019. Doi:

<http://dx.doi.org/10.22386/ca.v7i1.263>.

YANG, C.; HE, X.; WANG, R.; YAN, F.; YU, L.; BU, K.; YANG, J.; CHANG, L.; ZHANG, S. The effect of urban green spaces on the urban thermal environment and its seasonal variations. *Forests*, v. 8, n. 5, p. 153, 2017. Doi: <https://doi.org/10.3390/f8050153>.

YANG, C.; WANG, R.; ZHANG, S.; JI, C.; FU, X. Characterizing the hourly variation of urban heat islands in a snowy climate city during summer. *International journal of environmental research and public health*, v. 16, n. 14, p. 2467, 2019. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph16142467>.

ZURQANI, H. A.; POST, C. J.; MIKHAILOVA, E. A.; ALLEN, J. S. Mapping Urbanization Trends in a Forested Landscape Using Google Earth Engine. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, v. 2, p. 173-182, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1007/s41976-019-00020>

Contribuições no artigo

María Eugenia Arias e Juan Pablo Celemín declararon haber participado en las siguientes etapas de la construcción del artículo: Concepción del manuscrito, Redacción del manuscrito, Revisión del manuscrito, Metodología, Discusión de resultados y Análisis de datos.

Fonte de financiamento da pesquisa, quando houver

Los autores declararon que la investigación no recibió financiación.