AREA 31(1)
NOVIEMBRE 2024
ABRIL 2025
ISSN 2591-5312

TEMÁTICA GENERAL
© SI-FADU-UBA

PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS ESTRATÉGICOS PARA LA GENERACIÓN DE ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO EN LAS ÁREAS URBANAS DEL AMBA (2003-2022)

STRATEGIC OPERATIONAL PROCEDURES FOR GENERATING SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSES OF LAND COVER AND LAND USE IN URBAN AREAS OF AMBA FOR THE PERIOD 2003-2022

PALABRAS CLAVE
Uso de la tierra y cobertura del suelo,
Áreas urbanas,
Herramientas tecnológicas,
Monitoreo,
Índice de vegetación de diferencia normalizada

KEYWORDS
Land use and land cover
Urban areas
Technological tools
Monitoring
Normalized difference vegetation index

DIANA DE PIETRI, PATRICIA DIETRICH, SILVIA BOGLIOLI, ALEJANDRO CARCAGNO Y MARÍA ADELA IGARZÁBAL
Universidad de Buenos Aires
Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo
Centro de Información Metropolitana

RECIBIDO
25 DE ABRIL DE 2024
ACEPTADO
12 DE ABRIL DE 2025

EL CONTENIDO DE ESTE ARTÍCULO ESTÁ BAJO LICENCIA DE ACCESO ABIERTO CC BY-NC-ND 2.5 AR

INFORMACIÓN PARA CITAR ESTE ARTÍCULO
De Pietri, Diana; Dietrich, Patricia; Boglioli, Silvia; Carcagno, Alejandro e Igarzábal, María Adela (Noviembre de 2024-Abril de 2025). Procedimientos operativos estratégicos para la generación de análisis espacial y temporal de la cobertura y uso del suelo en las áreas urbanas del AMBA (2003-2022). *AREA*, *31*(1), 1-26. https://doi.org/10.62166/area.31.1.3127

RESUMEN

El crecimiento urbano acelerado ha causado cambios profundos en el uso del suelo, lo que ha resultado en la pérdida de biodiversidad y la disminución de los servicios ecosistémicos. Esta situación plantea importantes desafíos ecológicos y sociales, lo que resalta la necesidad de metodologías integradoras para evaluar y abordar el impacto de las actividades humanas en los ecosistemas.

La evaluación del impacto ambiental derivado de los cambios en la cobertura y uso del suelo en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) durante el período 2003-2022 permitió caracterizar transformaciones clave en el territorio. A través del uso de herramientas tecnológicas de acceso libre y código abierto, como imágenes satelitales, se analizaron procesos tales como la pérdida de superficie verde, la degradación de la integridad del paisaje y el deterioro del valor ecosistémico, con especial énfasis en la reducción de la permeabilidad del suelo.

Asimismo, se ajustaron procedimientos operativos estratégicos que integran estas tecnologías para el monitoreo ambiental y el análisis geográfico. Este enfoque facilitó el establecimiento de aspectos de los servicios ecosistémicos relacionados con los espacios verdes urbanos, sirviendo como guía para la creación de estándares orientados a la toma de decisiones estratégicas. Estas medidas tienen como objetivo mejorar la calidad de vida y fortalecer la resiliencia urbana frente a los desafíos del crecimiento acelerado.

ABSTRACT

Rapid urban growth has led to profound changes in land use, causing biodiversity loss and a decline in ecosystem services. This presents significant ecological and social challenges, highlighting the need for integrative, evidence-based methodologies to assess and address the impact of human activities on ecosystems.

The methodological approach adopted by CIM/FADU/UBA focuses on the use of open-source technological tools such as Open Foris and Google Earth Engine. These platforms support strategic decision-making and optimize territorial planning with the aim of promoting more sustainable and livable cities.

The analysis conducted shows that urban growth is closely linked to the deterioration of ecosystem services, impacting critical functions such as water regulation and air quality. The expansion of built-up areas has significantly reduced natural spaces, with a 77% loss of vegetation between 2009 and 2022. Additionally, soil impermeabilization limits water infiltration, increasing flood risks and altering the hydrological cycle. The NDVI index reflects a decline in urban areas' ability to provide essential ecosystem services. However, urban peripheral areas still maintain crucial vegetation vigor, although they face constant threats due to urban expansion.

This analysis categorically demonstrates the urgent need to adopt sustainable urban planning strategies that not only prioritize but ensure the conservation of green areas and the protection of essential ecological services. These actions are not optional but imperative to safeguard community quality of life and guarantee environmental sustainability in the future.

ACERCA DE LAS AUTORAS Y EL AUTOR

Diana De Pietri. Licenciada y Doctora en Ciencias Biológicas. Especialista en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección aplicado a recursos naturales y sanitarios por la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), Suiza. Docente investigadora del Centro de Información Metropolitana de la Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires. Con experiencia en investigación desde 1999 y como directora de proyectos académicos desde 2002. Sus productos se muestran en las numerosas presentaciones en reuniones científicas y tecnológicas y en las publicaciones temáticas en libros y revistas nacionales e internacionales.
✉ <dianadepietri@fadu.uba.ar>

Patricia Dietrich. Arquitecta y Especialista en Sistemas de Información Geográfica (SIG), coordinadora y docente. Investigadora del Centro de Información Metropolitana de la Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires, durante 33 años. Categorizada por la Secretaría de Políticas Universitarias, Ministerio de Cultura y Educación. Como especialista en SIG ha participado en la elaboración de proyectos UBACyT, proyectos de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, trabajos específicos a terceros y exposiciones, diagramación y diseño de publicaciones.
✉ <pdietr@fadu.uba.ar>

Silvia Boglioli. Diseñadora Gráfica por la Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad de Buenos Aires (UBA). Investigadora del Centro de Información Metropolitana (CIM) de la FADU-UBA. Opera con diferentes softwares específicos en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Aplica los SIG al campo urbano y territorial. Diseños para la difusión de proyectos y ponencias a ser presentados en eventos científicos del CIM y en Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del CIM-FADU-UBA. Exposición y colaboración en conferencias, seminarios y talleres.
✉ <silvia.boglioli@fadu.uba.ar>

Alejandro Carcagno. Investigador del Centro de Información Metropolitana de la Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires por más de 14 años. Especialista en Sistemas de información Geográfica, normalización y realización de bases de datos. Ha participado en la elaboración de proyectos UBACyT, proyectos de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, trabajos específicos a terceros, exposiciones, diagramación y diseño de publicaciones.
✉ <acarcagno@yahoo.com.ar>

María Adela Igarzabal. Arquitecta y Planificadora Urbana y Regional por la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad de Buenos Aires (UBA). Directora del Centro de Información Metropolitana (CIM) de la FADU-UBA. Es Investigadora Docente Categoría II y Profesora Consulta. Ha sido socia fundadora de PLANCONSULT. Desde la década del ochenta se dedica a aplicar los Sistemas de Información Geográfica al campo urbano y territorial. Es autora y coautora de numerosos artículos y ponencias presentados a seminarios y encuentros. Ha sido directora y codirectora de numerosos proyectos UBACyT y proyectos de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.
✉ <cimmai@fadu.uba.ar>

CONTRIBUCIONES DE AUTORÍA (CRediT)

Diana De Pietri: Conceptualización, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Supervisión, Visualización, Redacción del borrador original, Redacción, revisión y edición.

Patricia Dietrich: Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Software, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción del borrador original, Recursos.

Silvia Boglioli: Curación de datos, Investigación, Software, Visualización, Recursos, Redacción, revisión y edición.

Alejandro Carcagno: Curación de datos, Investigación, Metodología, Software, Visualización, Recursos, Redacción del borrador original, Redacción, revisión y edición.

María Adela Igarzábal: Conceptualización, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Supervisión, Redacción del borrador original, Redacción, revisión y edición.

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Introducción

El acelerado crecimiento urbano en áreas metropolitanas como el AMBA (Área Metropolitana de Buenos Aires) trae consigo transformaciones significativas en el uso y la cobertura del suelo. Estas transformaciones comprometen servicios ecosistémicos esenciales, afectando la sostenibilidad ambiental, la resiliencia climática y la calidad de vida de la población.

Los servicios ecosistémicos se definen como los beneficios que los seres humanos obtienen, de manera directa o indirecta, de los ecosistemas. Se dividen en cuatro categorías principales: servicios de provisión (bienes tangibles como alimentos, agua, madera y recursos genéticos); servicios de regulación (procesos ecológicos que controlan el clima, la calidad del aire, el ciclo del agua y la polinización); culturales (beneficios inmateriales como la recreación, la espiritualidad y los valores estéticos y educativos) y de soporte (procesos fundamentales como la formación del suelo, el ciclo de nutrientes y la fotosíntesis, que sustentan los demás servicios ecosistémicos).

La interacción entre la provisión de servicios ecosistémicos y los procesos de urbanización se evalúa considerando los efectos del crecimiento urbano sobre la funcionalidad ecosistémica. Dentro de los impactos más relevantes se identifican la pérdida de biodiversidad y la disminución en la prestación de servicios clave, lo que supone retos significativos en términos ecológicos y sociales. Incluso alteraciones menores y aparentemente aisladas pueden provocar repercusiones acumulativas importantes, afectando la calidad de vida local y el funcionamiento integral de las comunidades (ICLEI Colombia, 2023).

La expansión de las ciudades plantea tanto desafíos cruciales como oportunidades valiosas para diseñar entornos más habitables, saludables y resilientes (Kozak, 2023; Municipalidad de Curridabat, 2019). Entre los aspectos más relevantes del crecimiento urbano acelerado se destacan:

1. falta de información precisa y continua sobre los cambios espaciales y temporales en la cobertura y el uso del suelo en áreas urbanas;
2. impacto negativo de las actividades humanas (como la urbanización y la infraestructura) sobre las funciones ambientales del suelo y la provisión de servicios ecosistémicos;
3. escasa integración de datos satelitales o plataformas similares en los diagnósticos locales que puedan fortalecer la toma de decisiones estratégicas;
4. falta de requerimientos de enfoques que prioricen la sostenibilidad y la resiliencia urbana en la planificación territorial.

Paralelamente a estas problemáticas, existe una brecha en la implementación de metodologías integradoras que permitan monitorear, analizar y modelar estas dinámicas de manera estratégica y basada en evidencia. El uso de herramientas tecnológicas accesibles y de código abierto se presenta como una solución clave.

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación del Centro de Información Metropolitana (CIM) de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad de Buenos Aires (UBA), que indagó el uso de esas herramientas para el monitoreo ambiental a fin de contribuir a programas,

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

proyectos y planes de evaluación, seguimiento y toma de decisiones (De Pietri, Dietrich, Carcagno, Boglioli e Igarzabal, 2024; De Pietri, Dietrich, Carcagno e Igarzabal, 2023; De Pietri, Dietrich, Boglioli, Carcagno e Igarzabal, 2023; GIMBUT, 2018; GEE, 2018; FAO, 2009; De Pietri, Dietrich e Igarzabal, 2008).
En este marco el objetivo del trabajo fue analizar el impacto ambiental de los cambios en la cobertura y el uso del suelo en áreas urbanas del AMBA durante el período 2003-2022, mediante la adaptación y validación de herramientas originalmente diseñadas para inventarios forestales, con el propósito de optimizar la planificación territorial, fortalecer la provisión de servicios ecosistémicos, mejorar la resiliencia urbana frente a desafíos climáticos y ambientales, y generar escenarios basados en evidencia para apoyar la toma de decisiones estratégicas en programas de evaluación y seguimiento ambiental.

Antecedentes del conocimiento del tema

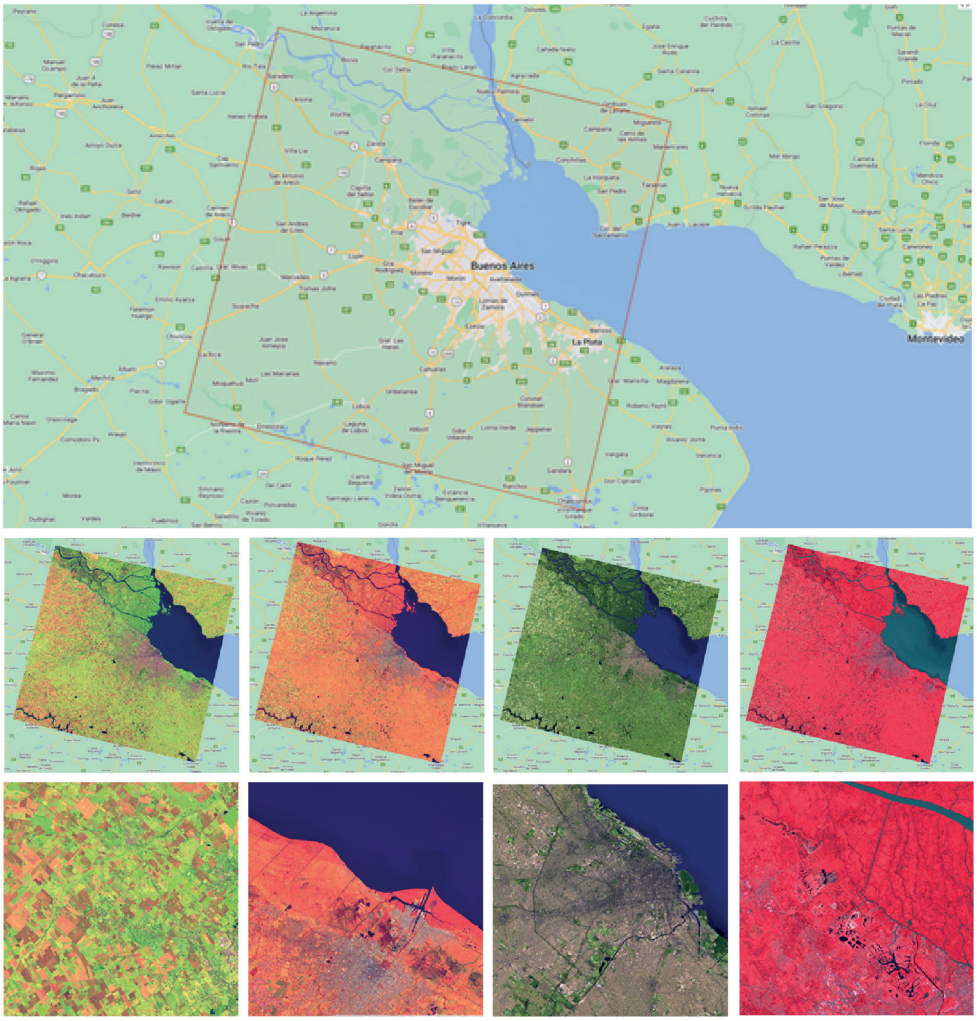
Datos satelitales

La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la tierra. Entre otras herramientas, como las mediciones de campo y los modelos numéricos, la teledetección desempeña un papel importante al proporcionar periódicamente datos de áreas a diferentes escalas, y medir, por ejemplo, toda la vegetación de una ciudad, celda por celda; datos necesarios para una descripción completa de los sistemas urbanos.
Una de las potencialidades de la teledetección, es la capacidad de discriminar diferentes cubiertas vegetales, usos de la tierra, masas de agua, o los efectos generados por fenómenos naturales o provocados por la actividad humana gracias a la existencia de bandas multiespectrales (los datos captados por los satélites se registran en diferentes bandas del espectro electromagnético). La elección de las bandas para realizar la composición, y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del sensor sobre el que se trabaje y de la aplicación del proyecto. En este caso se combinaron las bandas de escenas satelitales obtenidas del repositorio *Imagen Collection del Google Engine* (Figura 1, pág. siguiente).
Estas características hacen a la teledetección una herramienta potente para rastrear y monitorear los diferentes procesos ecológicos y ambientales, cuya dinámica puede estar bien representada por cambios temporales y espaciales. Dependiendo de la naturaleza del suceso o fenómeno en estudio, esporádico o continuo, la selección de imágenes, las escalas de trabajo y los métodos de análisis son muy dispares. Hay dos enfoques predominantes:

1. Cuando se trata de determinar los cambios producidos entre dos fechas de referencia, a fin de evaluar la dinámica a largo plazo de un determinado fenómeno (como el crecimiento urbano, la deforestación, la expansión agrícola), las imágenes suelen considerarse con cierto lapso temporal (varios años), pero en la misma estación a fin de minimizar el efecto de factores externos de cambio.
2. Por el contrario, cuando el objetivo principal es seguir la evolución fenológica de una determinada cubierta vegetal cultivada o no cultivada, el énfasis se pone principalmente en estudiar su contraste estacional

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Collection del Google Engine "Landsat/ LC 08 /C01/TI ", Path 225, Row 84, corresponde al período 15 de Enero 2010 a 2021



USO AGRÍCOLA	VEGETACIÓN VIGOROSA	DETECCIÓN DE ZONAS URBANAS	INFRARROJO COLOR
Combinación de bandas 6, 5, 2 Verde brillante: Zona agrícola densamente cultivada. Naranja: Zona agrícola cultivada Marrón: con escaso cultivo. Azul oscuro: Indica la presencia de agua.	Combinación de bandas 5, 6, 2 Naranja oscuro: Indica una vegetación sana y bien desarrollada. Naranja claro: Indica una vegetación menos sana y no tan desarrollada. Gris: Áreas construidas Azul oscuro: Indica la presencia de agua.	Combinación de bandas 7, 6, 4 Gris: Área densamente construidas. Rosa: Área menos densamente construidas. Verde: Área vegetales Azul: Indica la presencia de agua.	Combinación de bandas: 5, 4, 3 Rojo: Indica una vegetación sana y bien desarrollada. Rosa: Áreas vegetales con vegetación menos desarrollada. Blanco: Áreas con escasa vegetación. Azul oscuro o negro: Indica la presencia de agua. Marrón: Vegetación arbustiva muy variable. Beige-dorado: Zonas de transición, prados secos asociados a matorral

Figura 1
Interpretación de escenas satelitales.
Fuente: elaboración propia.
Nota: cada combinación de colores (bandas) se puede personalizar para mejorar un tipo específico de objeto geográfico.

en un determinado período.

Índice de vegetación e indicadores

Entre las técnicas derivadas del uso de datos satelitales multiespectrales, se destaca el uso de índices de vegetación ya que la vegetación es un indicador importante para evaluar diferentes procesos biofísicos en los ecosistemas;

como los fenómenos relacionados con la pérdida de biodiversidad, la desertificación, la relación entre la vegetación y la erosión del suelo, y la interacción vegetación-clima. Los índices de vegetación son imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales de la misma imagen. El resultado permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinadas celdas relacionados con parámetros de las coberturas vegetales: densidad, índice de área foliar y actividad clorofílica. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base en la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Se ha utilizado ampliamente como indicador del vigor de la biomasa vegetal, en estudios relacionados a comportamiento de cultivos, así como de vegetaciones boscosas naturales (Cazorla, Cabello, Reyes, Guirado, Peñas, Pérez-Luque y Alcaraz-Segura, 2023; Geppert, 2022; López Caloca, Tapia McClung y Gómez Fernández, 2021; Pérez Gañan, 2019; Cerrón, del Castillo, Bonnesoeur, Peralvo y Mathez-Stiefel, 2019; Galeana Pizaña, Corona Romero y Ordóñez Díaz, 2019; Leija-Loredo, Reyes-Hernández, Reyes-Pérez, Flores-Flores y Sahagún-Sánchez, 2016; Britos y Barchuck, 2013; Rouse, Haas, Scheel y Deering, 1974).

Las clasificaciones funcionales proporcionan un marco útil para entender los cambios ecológicos a gran escala. Se plantea que los cambios en los ecosistemas se detectan más rápidamente considerando la caracterización funcional antes que la evaluación de sus componentes estructurales. Los atributos funcionales de los ecosistemas permiten la evaluación cualitativa y cuantitativa de los servicios de ellos, y estos servicios pueden monitorearse fácil y frecuentemente a través de la detección remota de grupos funcionales.

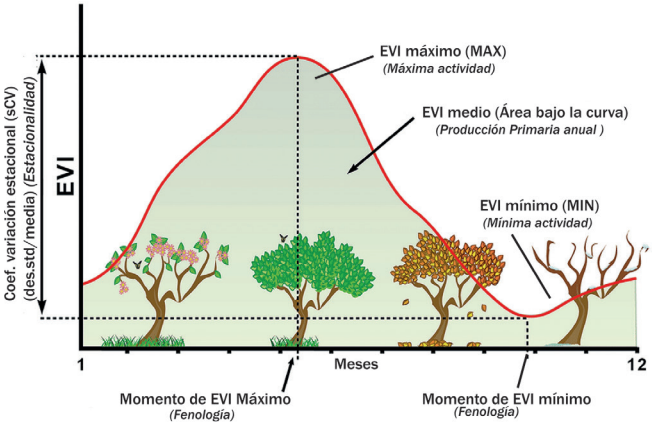
Los Tipos Funcionales de Ecosistemas (TFE) son agrupaciones de especies similares que poseen características semejantes (morfológicas, fisiológicas, conductuales, historia de vida y adaptaciones a través de una historia evolutiva común) y desempeñan papeles ecológicos equivalentes, tales como polinización, producción o descomposición, entre otros. El seguimiento de los cambios en los TFE permite caracterizar y monitorear de manera sintética, espacialmente explícita y con un mismo protocolo de observación, el nivel de provisión de servicios ecosistémicos. Entre sus aplicaciones se destaca la captura de la heterogeneidad espacial y temporal del funcionamiento de los ecosistemas, y el conocimiento de la diversidad de la región mediante la caracterización de la riqueza de grupos funcionales en parches de paisaje.

Los TFE se fundamentan en la dinámica de la *Productividad Primaria Neta Aérea* (PPNA) como un indicador esencial e integrador del funcionamiento ecosistémicos. Para su identificación se utilizan series temporales de índices de vegetación, que caracterizan la dinámica de las ganancias de carbono, por ejemplo, el NDVI que evalúa la calidad de la biomasa o el Enhanced Vegetation Index (EVI) basado en tres descriptores de la curva anual o dinámica estacional de los índices de vegetación. Estos capturan la mayor variabilidad de la serie temporal (Cuadro 1, pág. siguiente).

Se propone un enfoque ecosistémico en la planificación urbana basado en los procesos (Kozak, 2023). Por ejemplo, desde hace muchos años se estudia la influencia de los espacios verdes y la vegetación sobre las temperaturas en las zonas urbanas. Una evaluación de los beneficios de la vegetación (principalmente árboles) en las ciudades muestra que un solo árbol o un grupo

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Cuadro 1. Parámetros y descriptores de la dinámica estacional media del índice de vegetación EVI utilizado para la construcción de TFEs



PARÁMETROS DEL ÍNDICE VERDE (EFA)	DESCRIPCIÓN
Media anual del índice verde (EVI).	Es un estimador de la productividad primaria y uno de los descriptores más integradores del funcionamiento ecosistémicos (media del EVI).
Coeficiente de variación intra-anual del índice verde (EVI sCV).	Descriptor de la estacionalidad o diferencias en las ganancias de carbono entre estaciones. EVI máximo (MAX) - EVI mínimo (MIN).
Fecha en la que se alcanza el valor máximo del índice verde (EVI DMAX).	Indicador fenológico de la estación de crecimiento.

Fuente: Cazorla et al., 2023.

de árboles tienen un impacto positivo en la temperatura ambiente urbana. Los grandes parques, caracterizados por temperaturas más frías que sus alrededores, extienden su influencia positiva a las áreas urbanizadas circundantes y a las autovías cercanas, bajando las temperaturas. En este marco, los corredores verdes ofrecen una efectiva ventilación.

Entre otros procesos, la impermeabilización superficial genera alteraciones en el paisaje que impiden la infiltración, lo que puede dar lugar a respuestas impredecibles, como la afectación del caudal ecológico y las inundaciones de alto impacto. Estas transformaciones en el uso de la tierra dan como resultado cambios ambientales que pueden evaluarse a través de parámetros biofísicos (Jiang, Fu y Weng, 2015), y describirse a través de cambios en los extremos del gradiente, desde áreas con vegetación densa, temperatura baja y humedad superficial alta –superficies permeables– a áreas de vegetación escasa, temperatura alta y humedad superficial baja –superficies impermeables– (Figura 2).

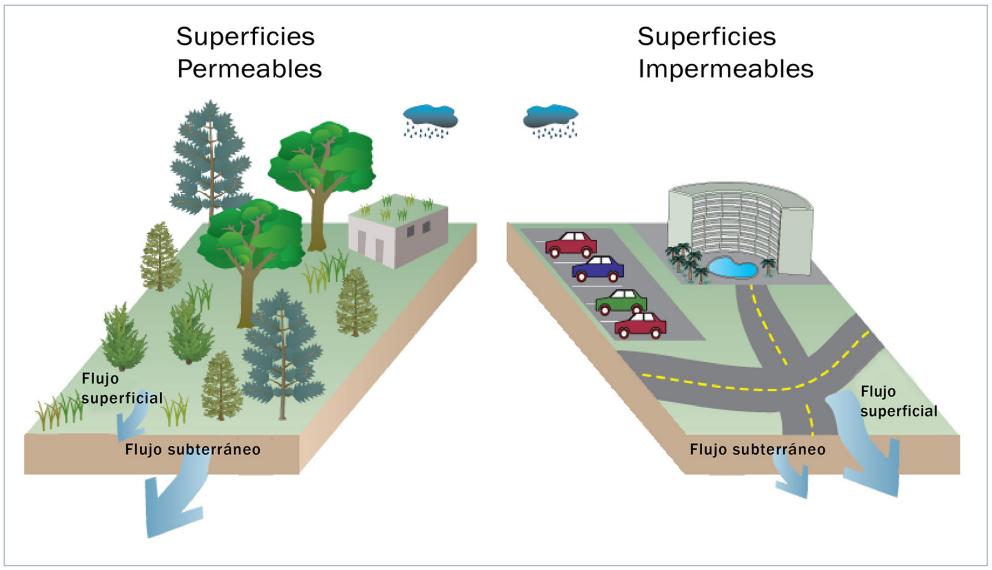


Figura 2

Cambios ambientales por la transformación del uso de la tierra. Fuente: López Caloca, Tapia McClung y Gómez Fernández, 2021.

Metodología

Procedimiento operativo

Etapa 1. Herramientas y datos

Análisis de las herramientas tecnológicas y características de los datos a relevar.

Open Foris (OF) es un conjunto de herramientas de software libre y de código abierto que facilita la recopilación, análisis y presentación de informes de datos de manera flexible y eficiente. Las herramientas incluyen una plataforma en línea para el diseño de encuestas, la gestión de datos, la utilización y el procesamiento, así como una aplicación móvil para la recopilación y validación de datos en el campo. También hay herramientas para el análisis colaborativo y eficiente de datos y la difusión de resultados. El OF ha sido desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) en colaboración con muchos países y socios para satisfacer la necesidad urgente de sistemas que permitan un monitoreo, informe y verificación precisa pero rentables de los bosques y otros tipos de cobertura terrestre.

Open Foris - Collect (OFC) es una herramienta que proporciona una manera rápida y flexible de configurar una encuesta que puede manejar múltiples tipos de datos y reglas de validación complejas.

Si la recopilación de datos a partir de imágenes requiere un muestreo sistemático o estratificado en un área geográfica seleccionada, el generador de cuadrículas *Collect Earth Grid Generador* en el OFC se puede utilizar como herramienta complementaria. Esta genera una grilla o malla de puntos geoespaciales sobre un área de interés.

Google Earth Pro, facilita el relevamiento de datos con el apoyo de otras plataformas como *Bing Maps, Google Earth Engine* (GEE), entre otras, para el análisis de imágenes de satélite de alta y muy alta resolución, para la cuantificación de los cambios de cobertura y uso de la tierra. GEE ofrece acceso a grandes conjuntos de datos geoespaciales, herramientas de análisis, geoprocesamientos y capacidades de visualización interactiva, permitiendo a diferentes usuarios realizar análisis y estudios a gran escala relacionados con el ambiente, el cambio climático, entre otros. Es un servicio en la nube con acceso a petabytes de información. Le da a *Earth Map* la capacidad de ejecutar estadísticas sobre la marcha en varias métricas como temperatura, precipitación, áreas quemadas, área cubierta de árboles, entre otras.

Earth Map facilita monitorear el territorio de una manera integrada y multitemporal. Permite visualizar, procesar y analizar imágenes satelitales y conjuntos de datos globales sobre clima, vegetación, incendios, biodiversidad, geosociales y otros temas.

El conjunto de herramientas de OF proporciona criterios útiles para contribuir a la toma de decisiones basada en datos, fortalecer la gestión sostenible y satisfacer las necesidades de información nacionales, regionales y locales. Simplifica varias mediciones en imágenes satelitales en información valiosa transferida o comunicada mediante la producción de estadísticas, gráficos, mapas e informes.

Entre las consideraciones o criterios para la construcción de bases de datos coherente a los fines del proyecto según las herramientas mencionadas están:

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

- Criticidad o relevancia para el monitoreo de los recursos terrestres según las características del sensor seleccionado, por ejemplo, Landsat TM.
  - Calidad de la escena satelital con relación a la presencia o ausencia de nubes en la fecha seleccionada o respecto de algún fallo que genere errores en los pixeles de la imagen.
  - Nivel de resolución espacial a fin de establecer los elementos/objetos geográficos a ser diferenciados a través de la imagen satelital por su nivel de detalle (techos, arbolados, entre otros).
  - Fecha de la escena satelital para identificar aspectos tales como:
    - El ciclo de vida de la vegetación, perenne o caduco.
    - Ocurrencia o no de precipitación previa.
  - Selección de los objetos geográficos a monitorear con base en los elementos de interpretación de la información satelital. Se consideró la agrupación jerárquica definida por Rocío Pérez Gañan (2019) con base en cuatro criterios: espectral (tono y color), espacial simple (textura, tamaño y forma), espacial complejo (sombras, localización, patrón especial) y temporal (condiciones estacionales).
- Factores organizacionales que intervienen en el uso de información
  - Selección de un modelo de análisis para la clasificación del dato:
    - Definición de categorías y subcategorías para el proceso de análisis espacio-temporal de la información proveniente del territorio (generar un catálogo de indicadores).
    - Comparación de las clases y subclases en el mismo período estacional para determinar una métrica de cambio (metros cuadrados de bosque caducifolio en verano del 2000 vs. 2010).
    - Rango del período de comparación, por ejemplo, cada 5 o 10 años.
    - Definición de las transformaciones de cobertura y usos de la tierra posibles según el área de estudio.

Etapa 2. Área de estudio

Breve caracterización del AMBA.

Es una de las regiones urbanas más extensas y densamente pobladas de Argentina. Su cobertura y usos del suelo presentan una mezcla compleja de áreas urbanizadas, espacios verdes y terrenos destinados a actividades productivas. El crecimiento desordenado y la expansión metropolitana han generado desafíos en la gestión sostenible de estos usos del suelo, afectando la funcionalidad de los ecosistemas y la provisión de servicios esenciales.
La delimitación del área de estudios contempló:

- El alcance geográfico o extensión del área de interés.
- El proceso principal para analizar, por ejemplo, el crecimiento urbano y las transformaciones que conlleva en el territorio.
- La métrica de medición. Los procesos de crecimiento urbano fueron analizados en su vínculo con cambios de usos del suelo asociados al tipo de cobertura.
  - La cobertura de la tierra se define como los materiales y entidades bióticas que se observan sobre la superficie terrestre (vegetación, roca, agua, entre otras).
  - Los usos de la tierra se refieren a las actividades que se lleva a cabo en una unidad de tierra.

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Es importante considerar que las relaciones son variadas, pudiendo existir múltiples usos en un mismo tipo de cobertura de la tierra y viceversa.

Para analizar las tendencias en los cambios de los tipos de cobertura del suelo y uso de la tierra, se seleccionó la mancha urbana del AMBA. Esta mancha urbana se define por los límites físicos que resultan de la continuidad de sus componentes materiales, abarcando así más de un distrito político-administrativo. En total, ocupa una superficie de 268.300 hectáreas (Igarzabal y Vidal, 2004). La región metropolitana, por su parte, se extiende más allá de la mancha urbana, incluyendo centros cercanos de distintos tamaños situados dentro de los límites administrativos de los municipios (Figura 3).

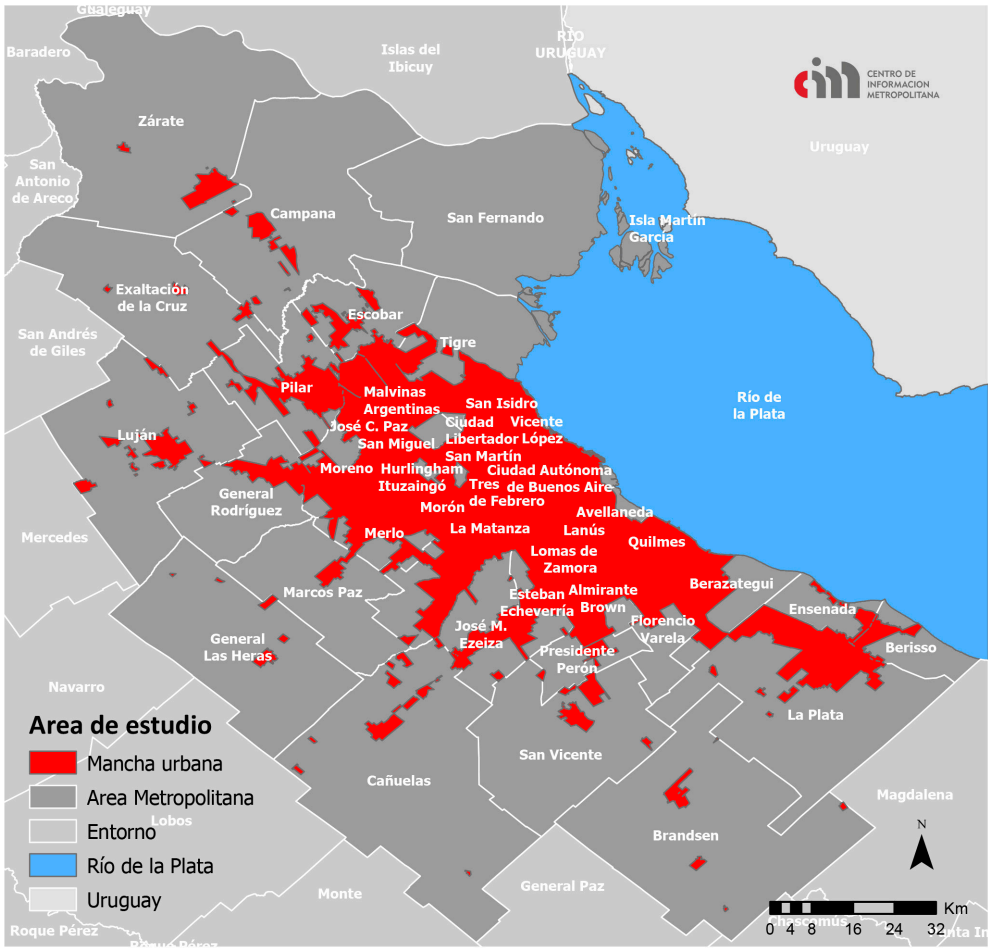


Figura 3
Área Metropolitana de Buenos Aires, AMBA.
Fuente: elaboración propia.

Etapa 3. Relevamiento de los datos

Identificación y clasificación de los elementos del territorio para la construcción de la base de datos del proyecto.

Clasificación de objetos geográficos (OG)

El relevamiento de información para la construcción de la base de datos del proyecto requiere una identificación previa de los elementos del territorio/OG detectables en la escena satelital en base a los elementos que lo componen. La identificación de los OG es resultado de la interpretación de la cobertura (natural vs. antrópica) y sus características (entorno/uso, forma, materialidad). La clasificación por la cobertura natural del territorio se refiere a la extensión de la superficie terrestre cubierta por vegetación (arboles, pastizales),

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

agua (ríos y lagos) y suelo (desnudo, anegado). Los tipos de cobertura natural varían según la región y pueden incluir bosques, pastizales, matorrales, humedales, entre otros.
Por otro lado, la cobertura antrópica se centra en objetos que han sido creados, modificados o afectados por la actividad humana. La cobertura antrópica se refiere a la modificación de la superficie terrestre por la acción humana. Esto puede incluir la construcción de ciudades, vías de comunicación, infraestructuras industriales, entre otros. Incluye:

1. La construcción de casas, edificios, industrias, calles, carreteras, entre otras.
2. Las características de los OG según su uso (edificios residenciales, industriales, comerciales o recreativos); su forma (objetos lineales, como autovías y ríos, y objetos poligonales, como industrias o tierras de cultivo); su materialidad/sustancia (agua, vegetación, hormigón, entre otras).

Tabla 1. Clasificación de los OG

NATURAL					
COBERTURA	OG		CARACTERÍSTICA DE LOS OG		
		CONDICIÓN ECOLÓGICA	USO	FORMA	MATERIALIDAD
Verde	Árbol Arbusto Césped Herbácea	Permeable	Bosque Cultivo Jardines Parque Plaza Plazoletas Canchas Otros	Polígono	Verde o biota
Agua	Cursos de agua	Permeable	Recreación Deportes Navegación	Lineal Polígono	Agua
Tierra	Suelo desnudo	Permeable	Zona libre de vegetación (baldío, basural)	Polígono	Tierra, residuos

ANTRÓPICO					
COBERTURA	OG		CARACTERÍSTICA DE LOS OG		
		CONDICIÓN ECOLÓGICA	USO	FORMA	MATERIALIDAD
Construido	Casas Edificios Establecimiento colectivo Establecimiento Industrial Estacionamiento Patios	Impermeable	Residencial Comercial Institucional Recreativo	Polígono	Baldosa Cemento Cerámica Chapa Madera Membrana Piedra Pintura asfáltica Teja
Circulación Terrestre	Autopistas/rutas Bici senda Calle/avenida Pista Vereda	Impermeable	Peatonal Vehicular	Lineal	Adoquín Asfalto Cemento Tierra Otros

Fuente: elaboración propia.

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Diseño de muestreo y encuesta satelital

La recolección de datos se realizó mediante encuestas creadas *ad hoc* a través de la OFC. Su preparación requirió seleccionar el espacio geográfico que representaba la extensión del área de estudio, y definir el número y distribución de muestras para esa superficie. El OF permite importar un archivo en formato *shapefile*, utilizando un algoritmo realizado en Javascript en la aplicación web GEE. Mediante *Collect Earth Grid Generator* se importa el archivo subido en el proceso anterior, se define la cantidad de puntos que se desea, con el objetivo de garantizar la representatividad de las encuestas y se determina el número de muestras en función de la superficie a estudiar. En esta instancia, para realizar una prueba preliminar, se seleccionaron 100 muestras, distribuidas aleatoriamente dentro del área de estudio. Este archivo se exporto en formato ∗.csv. (Figura 4).

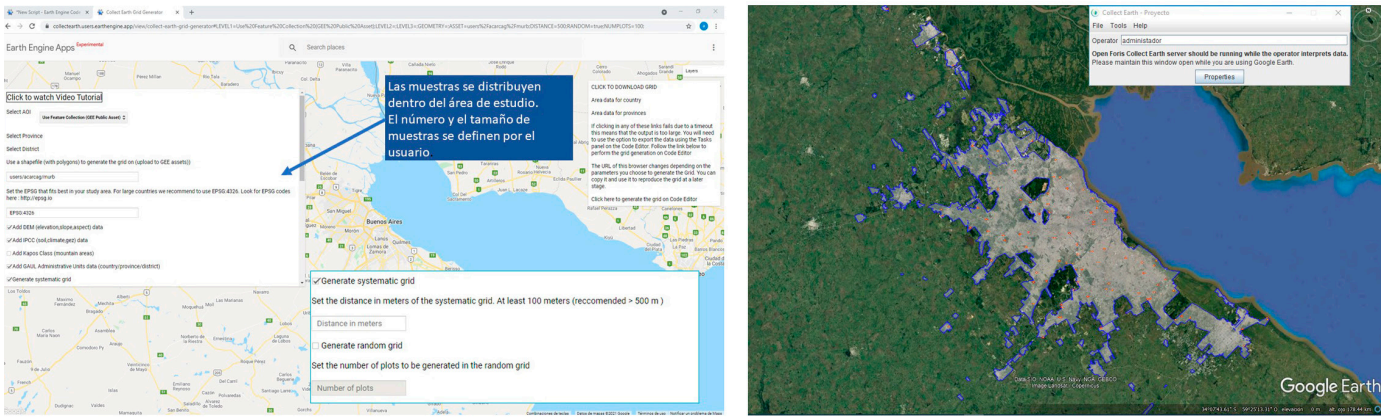


Figura 4

Diseño de muestreo y vista de la distribución de muestras en el AMBA.

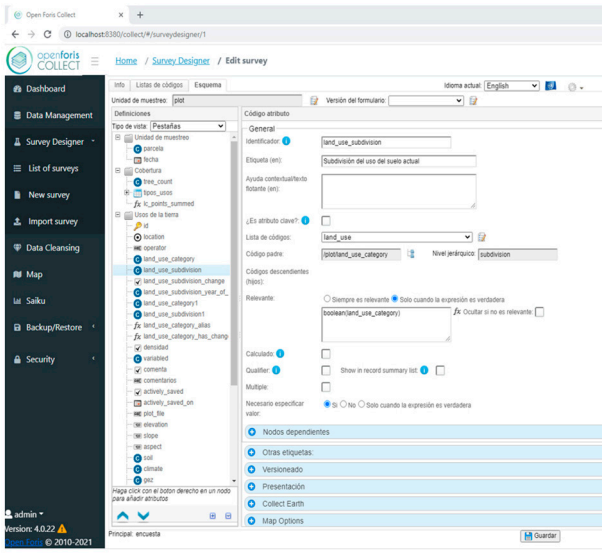
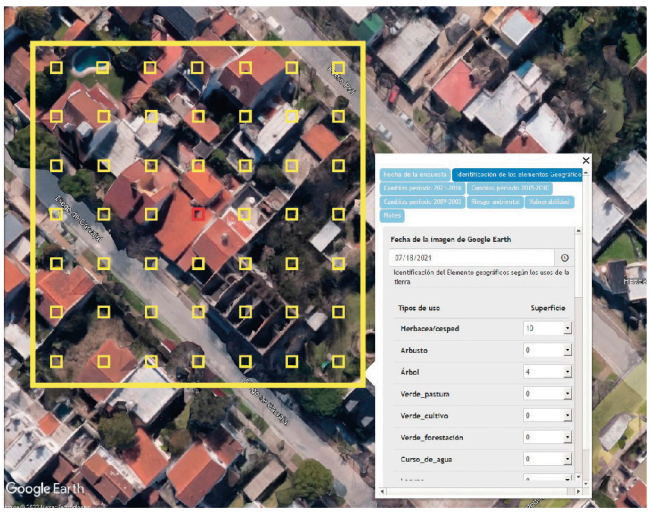
Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 2 (pág. siguiente) muestra la aplicación para generar una nueva encuesta, especificando su nombre, la plantilla a utilizar, el idioma de la encuesta y el grupo de usuarios. Una vez definidos los campos anteriores se completan tres pestañas (Info – Lista de Códigos – Esquema).

En *Info* se definió el nombre del proyecto y se adjuntó el archivo con el diseño de parcelas generado por *Collect Earth Grid Generator*. En este caso, se asignó una superficie de media hectárea, a la que correspondió una grilla de 7x7 puntos. Esta superficie y cuadrícula se eligieron para mostrar de manera efectiva objetos geográficos previamente definidos para el área urbana. La *Lista de códigos* enumera y administra conjuntos predefinidos de opciones o categorías que se pueden usar en preguntas de opción múltiple o de opción única dentro de una encuesta. A partir de estos listados se desarrollaron cuestionarios estructurados que cubrían los aspectos relevantes del estudio, considerando las opciones de respuesta y la secuencia lógica de recolección de datos. Incluye, entre otros factores, períodos de tiempo, objetos geográficos y cobertura (número de puntos en la cuadrícula de la encuesta superpuestos al objeto geográfico evaluado). En la tercera pestaña, *Esquema*, se generan diferentes tipos de preguntas, como opción múltiple, opción única, opción numérica, fecha, texto abierto, entre otras, generando la base de la encuesta. Las respuestas a las preguntas de opción múltiple y de opción única también están puntuadas, lo que garantiza que las preguntas se presenten de manera coherente y fácil de seguir.

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Cuadro 2. Confección de la encuesta

DISEÑO ENCUESTA	ENCUESTA SATELITAL
Explicación en los párrafos anteriores.	Muestra satelital de 0,50 hectáreas con grilla de 49 puntos para estimación de la cobertura del objeto geográfico. Se contabiliza el número de puntos de la grilla superpuestos sobre cada OG. La suma total de los puntos asignados debe ser igual a 49.
	

Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 3 (pág. siguiente) ejemplifica las diferentes pestañas que contienen los aspectos considerados en la encuesta y los tipos de preguntas desarrolladas para la encuesta de los diferentes OG de cada una de las 100 muestras. La encuesta consta de seis pestañas/solapas, cada una con una plantilla específica donde se deben rellenar o marcar los datos correspondientes.

Etapa 4. Análisis de los resultados

Herramientas estadísticas para el análisis de los datos.

Variabilidad de los OG en diferentes períodos

En la última etapa metodológica, los datos recolectados se analizan a través de herramientas estadísticas con el fin de caracterizar los usos del suelo y su tendencia de cambio.

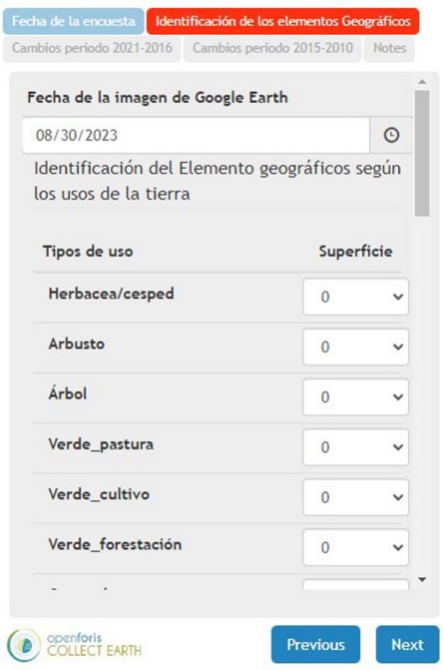
Cabe recordar que para evaluar los OG se compara el estado de su cobertura en las diferentes fechas proporcionadas por el GE, y que dicha información se registra a través de la encuesta satelital (Cuadro 3, pág. siguiente). Es decir, el análisis de cambios de uso de la tierra se elabora entre los muestreos correspondientes al período 2022 (actual) y los correspondientes a los períodos 2015-2010-2005. Este análisis se realizó en una sola estación climática, correspondiente al verano (diciembre, enero, febrero, marzo).

Las variables de riesgo ambiental, amenaza y vulnerabilidad, no fueron incluidas en el análisis por mostrar una distribución homogénea en las muestras del área de estudio.

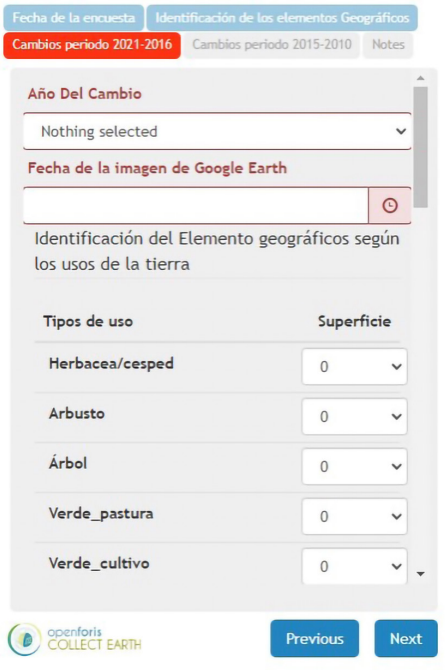
Por último, se utilizaron diferentes métodos de análisis estadístico (Tabla 2, p. 16).

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

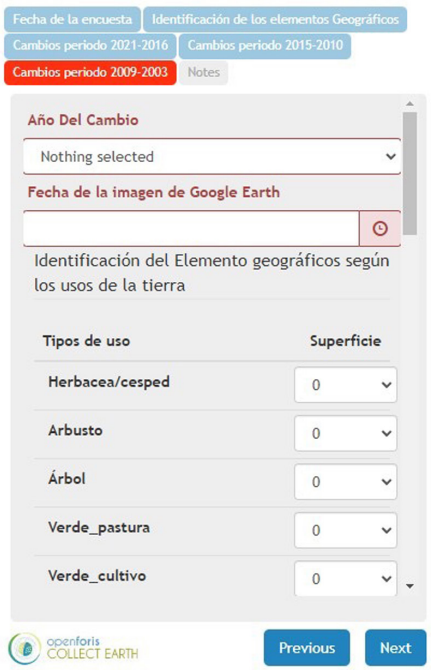
Cuadro 3. Plantilla específica para el relevamiento satelital



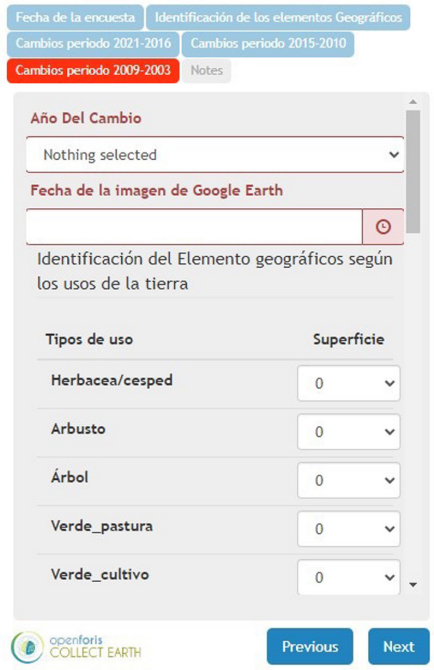
1. Cobertura de los OG actual.
Se contabiliza el número de puntos de la grilla superpuestos sobre cada OG. La suma total de los puntos asignados debe ser igual a 49. La calidad de la escena satelital seleccionada debe ser adecuada para discernir OG en la estación del año que corresponde según objetivo planteado.



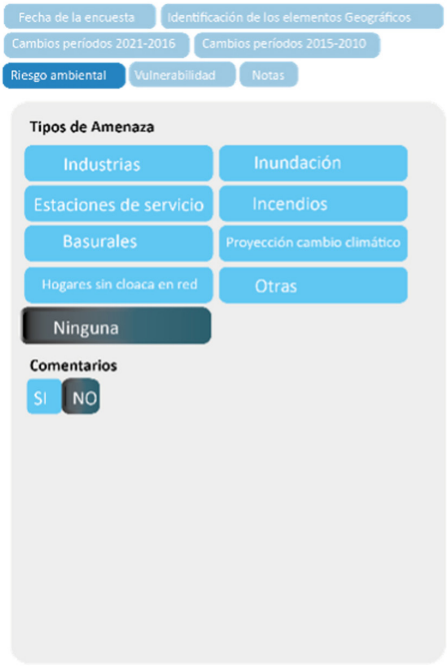
2. Cobertura de los OG Período 2021-2016
Se contabiliza el número de puntos de la grilla superpuestos sobre cada OG. Pero, solamente se registran las variaciones en cobertura del OG observadas en el 2021-2016 en relación a la cobertura de ese OG en el 2022.



3. Cobertura de los OG Período 2015-2010
Se contabiliza el número de puntos de la grilla superpuestos sobre cada OG. Solamente se registran las variaciones en cobertura del OG observadas en el 2010-2015 en relación a la cobertura de ese OG en el 2022.



4. Cobertura de los OG Período 2009-2003
Se contabiliza el número de puntos de la grilla superpuestos sobre cada OG. Solamente se registran las variaciones en cobertura del OG observadas en el 2003-2009 en relación con la cobertura de ese OG en el 2022.



5. Tipos de amenaza
Incluye información georreferenciada que explica las amenazas ambientales de origen natural y provocadas por el hombre en la zona. También se han añadido mapas de diferentes proyecciones de los posibles impactos del cambio climático.



6. Tipos de vulnerabilidad
Incluye información referida a la vulnerabilidad ambiental y social del área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Tabla 2. Herramientas para el análisis estadístico

INSTRUMENTO	RESULTADO ESPERADO
Base de datos	Generación de indicadores
Diagrama de barra	Tendencia de los indicadores
Ajuste a la curva/gráficos x/y	Asociación entre indicadores
Índice NDVI	Servicios ecosistémicos

Fuente: elaboración propia.

Valores medios por muestra según estacionalidad

Para zonificar los servicios ecosistémicos que brinda la vegetación, se definió como unidad de análisis la muestra y no el objeto geográfico. A diferencia del ítem anterior, se analizaron los datos correspondientes al verano e invierno de 2022. Los meses de verano corresponden a las fechas de las escenas satelitales de diciembre, enero, febrero y/o marzo mientras que los meses de invierno corresponden a junio, julio, agosto y septiembre de 2022.

Entre los índices satelitales que evalúan los servicios ecosistémicos en un área, se eligió el NDVI debido a su efectividad para determinar la vitalidad de la biomasa vegetal al registrar la cantidad y calidad de la vegetación en un sitio. Los datos del NDVI del AMBA se obtuvieron de la biblioteca de imágenes satelitales disponibles en GEE y se asociaron con el muestreo realizado desde *Open Foris*.

Para cada muestra, se obtuvo un valor de cobertura vegetal y un valor del NDVI tanto para las épocas de verano como para invierno. El valor NDVI de cada muestra se definió como un único valor que integra todos los objetos de interés presentes en la superficie analizada. Este índice oscila entre -1 y 1. A partir de la definición de clases de cobertura vegetal, se establecieron rangos de valores del NDVI con el fin de establecer categorías para evaluar los servicios ecosistémicos (Tabla 3). Para su categorización se asumió que los valores del NDVI son máximos cuando la muestra presenta una cobertura verde del 100% y corresponde a la estación de verano.

Tabla 3. Calidad de los servicios ecosistémicos

CANTIDAD DE PUNTOS EN LA MUESTRA	PORCENTAJE DE COBERTURA VERDE EN LA MUESTRA	RANGO DE EQUIVALENCIAS EN VALORES DEL NDVI	CATEGORÍAS EN EL MAPA	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS
12.5	25%	< 0.35		Regular
25	50%	0.36 a 0.50		Bueno
37	75%	0.51 a 0.65		Muy Bueno
49	100%	0.66 a 0.79		Excelente
49	100%	> 0.80		Óptimo

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Usos de la tierra y tendencias de transformación

La característica de los OG observados y registrados en el relevamiento satelital brindaron diferente tipo de información según la herramienta utilizada (Tabla 2).

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

La base de datos generada a partir de los porcentajes de cobertura de los OG en el área de estudio por fecha facilitó el análisis de la tendencia del cambio de uso del suelo. La clasificación realizada de los OG relevados resultó efectiva para la definición de indicadores ecológicos. Es decir, todas aquellas coberturas de los OG asociadas a una función de infiltración, absorción y/o acumulación de agua de lluvia fueron clasificadas y agrupadas en un indicador de permeabilidad a diferencia de aquellas que representaban condiciones de impermeabilidad y/o calentamiento de la superficie (Tabla 1).

El primer indicio de transformación de uso de la tierra fue establecido mediante el uso de gráficos de barras para el análisis de cobertura de los indicadores del estudio. Se detectaron comportamientos opuestos entre la cobertura natural y la superficie antrópica. La Figura 5 muestra que la cobertura natural actual es menor que la del período anterior, mientras la superficie antrópica es mayor en el período actual con relación al período anterior.

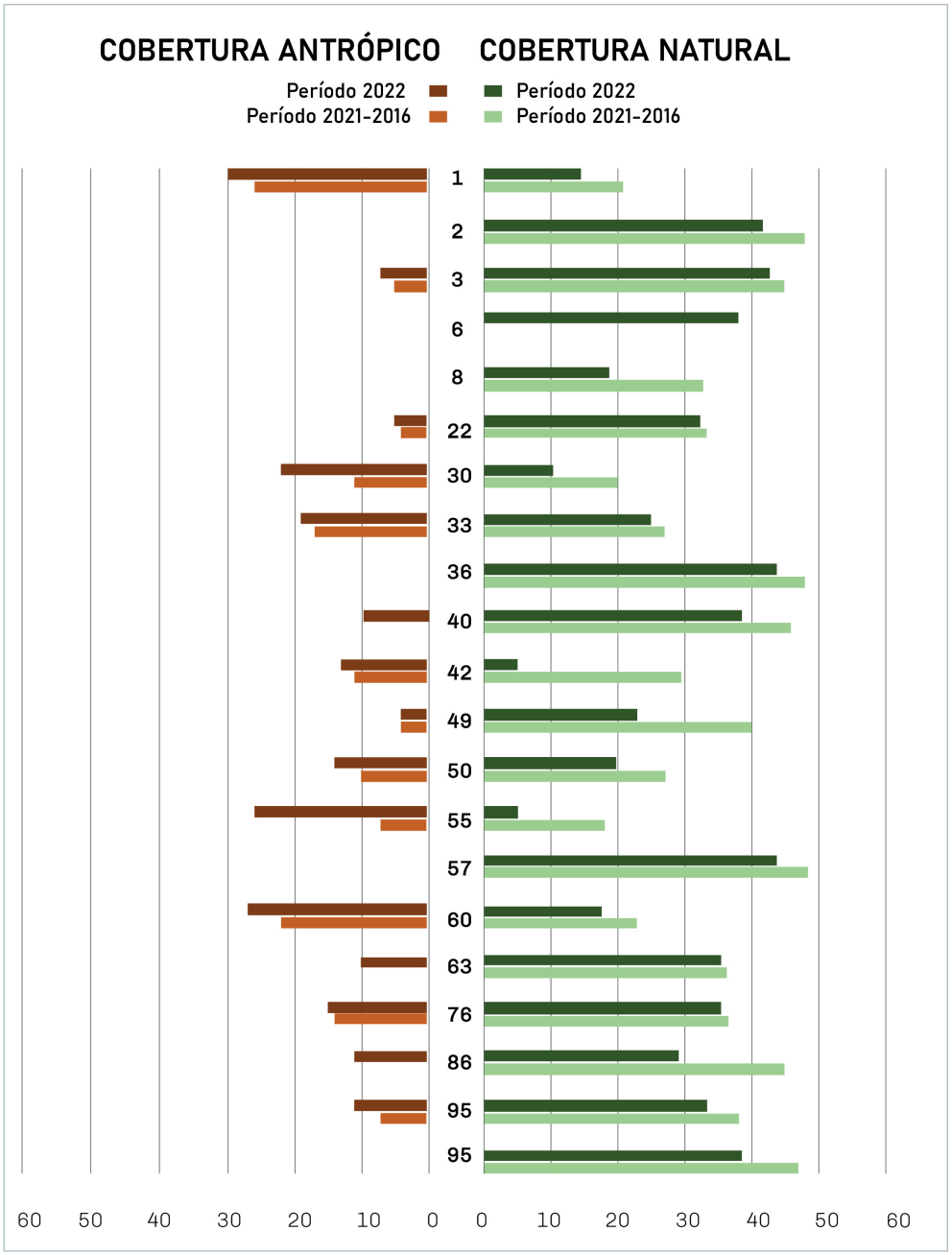


Figura 5

Comparación de la cobertura natural y la cobertura antrópica.

Fuente: elaboración propia.

Nota: porcentajes de superficie de vegetación y tierra (verde oscuro corresponde al período 2022, y el verde claro al período 2021-2016); y superficie de construido y circulación (el marrón oscuro corresponde al período 2022 y marrón claro al período 2021-2016).

El análisis de asociación posibilitó determinar el porcentaje de disminución de la cobertura natural debido al aumento de la superficie antrópica.

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Las asociaciones entre la pérdida de vegetación y el aumento del área construida se evaluaron en cada período mediante gráficos de dispersión (XY). El número de muestras incluidas en estos análisis estuvo determinado por la presencia del indicador en el período estudiado. En los gráficos de dispersión, la línea de tendencia resultante mide cómo se relacionan las dos métricas. En el lado izquierdo de la Figura 6, se muestra la asociación entre la pérdida de cobertura natural (eje Y, pérdida de verdor) y el aumento de la superficie antrópica (eje X, ganancia de construido) durante los diferentes períodos. La línea de tendencia representa el mejor ajuste entre ambas variables y se describe mediante la ecuación de la línea y el valor de R^2. A la derecha de la Figura 6, se presenta el área de estudio, donde se ilustra la vegetación perdida por la actividad antrópica de acuerdo con la línea de tendencia del gráfico XY. Los tonos más oscuros (marrones) indican las ubicaciones con la mayor pérdida de vegetación debido a la expansión urbana, en contraste con los tonos más claros (amarillos), que representan la menor pérdida. Se indica también la pérdida de vegetación estimada en relación con el aumento de la superficie construida para cada período analizado.

Asociación entre indicadores ecológicos **Distribución de los cambios en el uso**

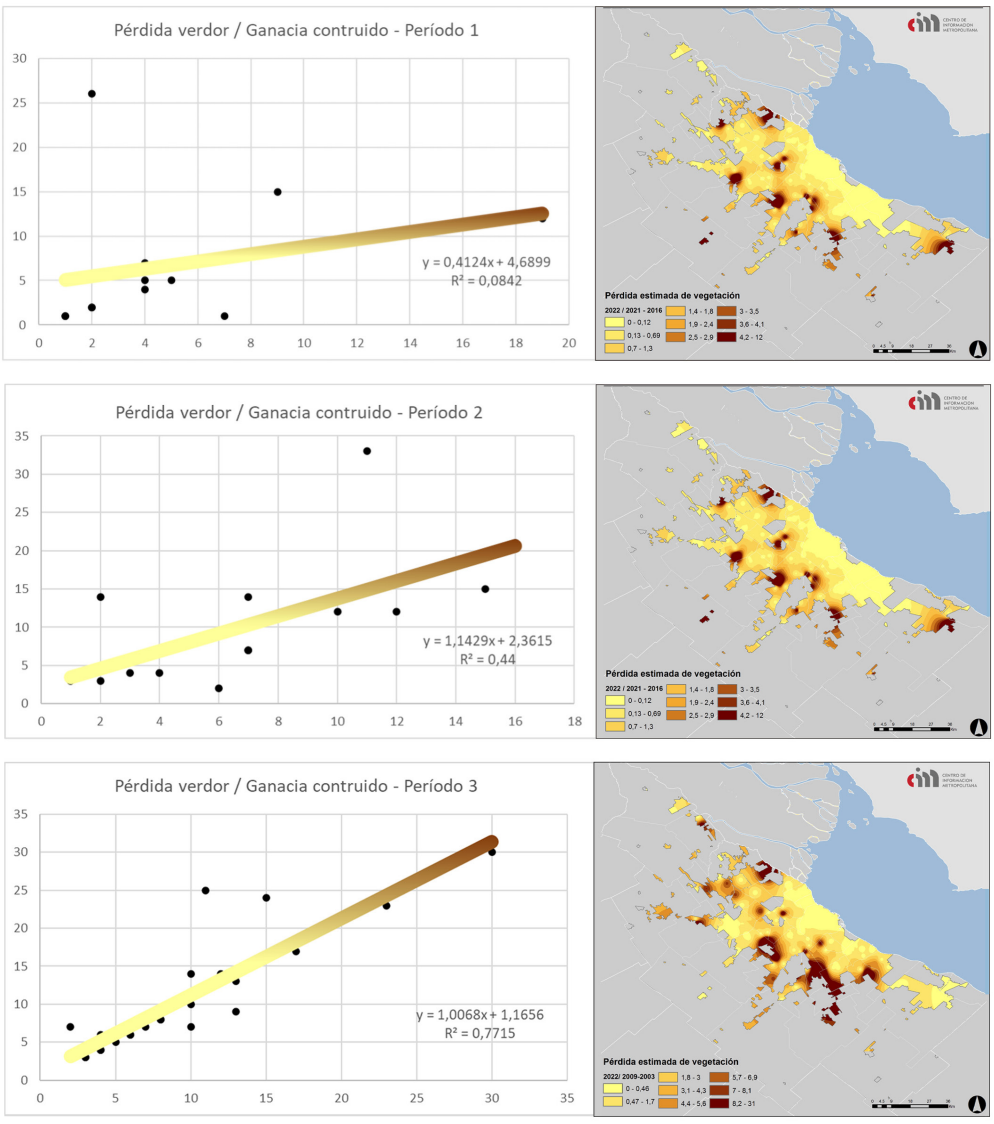


Figura 6

Pérdida de cobertura natural (verdor) debido al aumento de la superficie antrópica (construida). Fuente: elaboración propia.

El período 3 de la Figura 6 es una comparación del período actual 2022 con el período 2003 a 2009 mostró una clara correlación de la pérdida de vegetación debido al aumento de la superficie construida. Estos valores

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

indican que del 2009 al 2022, la cobertura de las áreas naturales relevadas disminuyó en un 77% debido a un aumento de la superficie antropogénica.

Índice verde: análisis de servicios ecosistémicos

Para cada muestra se obtuvo un valor de cobertura vegetal y un valor del NDVI tanto para las fechas de verano como de invierno. Según los criterios expresados en la Tabla 2 se indica que los sitios con abundante vegetación y con altos valores de NDVI presentan óptimos servicios ecosistémicos en contraposición con los sitios con escasa vegetación y bajos valores del NDVI. El vínculo entre estos factores fue estimado mediante análisis de asociación tanto para el verano como para el invierno. Los valores del NDVI en verde están asociados a la cobertura natural/verde, es decir, que por cada aumento en la superficie verde se genera un aumento en el valor del NDVI. Esta asociación presentó para el verano del 2022 un nivel de correlación R^2 igual a 0,7689. O sea, más del 75% del aumento de los valores de NDVI del AMBA en el verano de 2022 se explican por el aumento de la cobertura verde (Figura 7, imagen izquierda).

En base a lo anterior se zonificó la oferta de servicios ecosistémicos. En el mapa de la Figura 7, se observa un alto servicio ecosistémico debido a la vegetación principalmente en la periferia de la mancha urbana del AMBA.

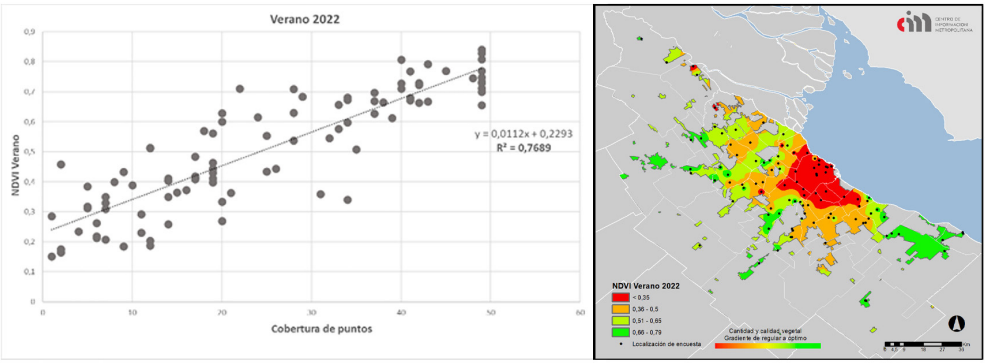


Figura 7
Izquierda, análisis de asociación entre la cobertura verde y el NDVI del verano de 2022. Derecha, mapa del NDVI en verano de 2022.
Fuente: elaboración propia.
Nota: los diferentes tonos del mapa representan la distribución de las categorías de los servicios ecosistémicos, desde un alto vigor vegetal (tonos verdes, verde claro) a bajo vigor vegetal (tono rojo).

Similar análisis se realizó para la cobertura verde y el NDVI correspondiente al invierno de 2022. El gráfico XY de la Figura 8 muestra una tendencia positiva de los puntos alrededor de la línea, pero con gran dispersión, indicando un bajo nivel de correlación, R^2 igual a 0,3649.

Cuatro de las muestras presentan valores de NDVI cercanos al cero e inclusive negativos en un rango de cobertura vegetal alto. Estos sitios con alta cobertura verde, pero con valores de NDVI bajos o extremadamente bajos pueden estar indicando alguna otra condición ambiental, como una superficie encharcada, cubierta de agua, vegetación en estado insalubre; o vegetación sin hojas verdes –especies caducifolias– lo que reduciría el índice verde.

En el mapa de la Figura 8 (pág. siguiente), se observa un bajo servicio ecosistémico brindado por la vegetación en gran parte de la superficie del AMBA.

Se observan diferencias de diversas magnitudes en los valores del NDVI entre verano e invierno. Para facilitar la comparación, estas diferencias correspondientes al verano e invierno de 2022 se superponen en los mapas de las Figuras 7 y 8 (ver Figura 9, pág. siguiente). Se establecieron cuatro clases de diferencia: escasa, media baja, media alta y abundante, que se visualizan a través del tamaño de los círculos, que varían de pequeños a grandes.

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

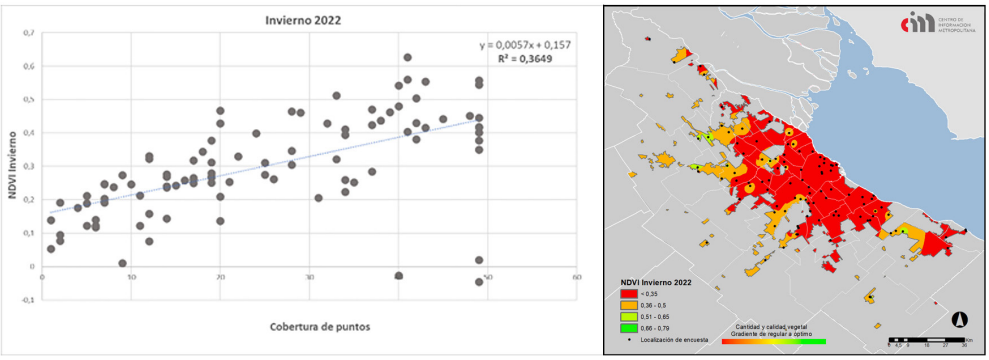


Figura 8

Izquierda, análisis de asociación entre la cobertura verde y el NDVI del invierno de 2022. Derecha, mapa del NDVI del invierno de 2022.
Fuente: elaboración propia.
Nota: los diferentes tonos observados en el mapa representan la distribución de las categorías de los servicios ecosistémicos, desde un alto vigor vegetal (tonos verdes claro) a bajo vigor vegetal (tono rojo).

El mapa del NDVI del verano (Figura 9, izquierda) revela que las mayores diferencias entre verano e invierno (representadas por grandes círculos grises) se distribuyen en áreas con un vigor vegetal de bueno a muy bueno. En contraste, el mapa del NDVI del invierno (Figura 9, derecha) muestra que las diferencias más pequeñas entre las estaciones (indicadas por pequeños círculos grises) se localizan en zonas con alta cobertura de suelo construido. Esto sugiere que en las muestras situadas en áreas boscosas, el índice de vegetación presenta mayores fluctuaciones estacionales en comparación con los valores observados en las zonas urbanas construidas. En esta última, la escasa vegetación no muestra variación significativa entre verano e invierno.

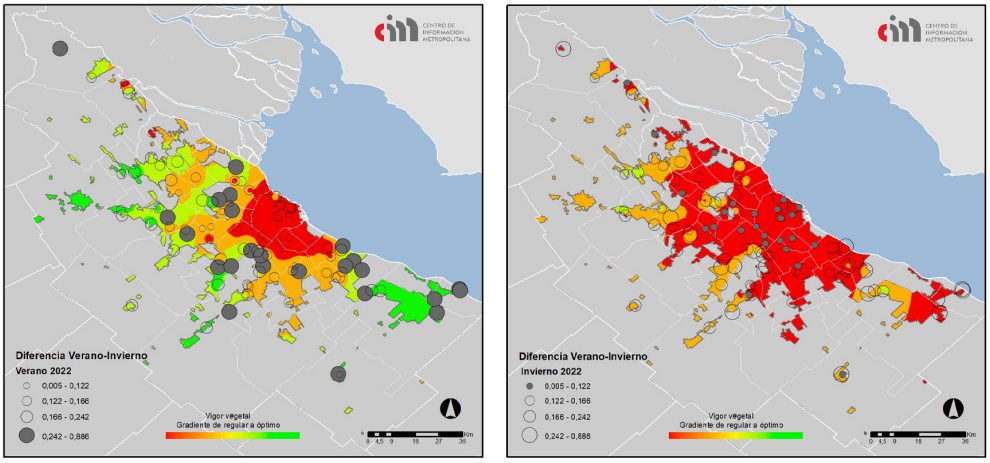


Figura 9

Comparación del NDVI verano-invierno de 2022.
Fuente: elaboración propia.
Nota: los diferentes tonos observados en los mapas de la Figura 9 representan la distribución de las categorías de los servicios ecosistémicos, desde un alto vigor vegetal (tonos verdes claro) a bajo vigor vegetal (tono rojo). Los círculos indican la magnitud de la diferencia entre el verano (círculos grandes) e invierno (círculos pequeños).

Consideraciones sobre el estudio

El estudio de los procesos interrelacionados entre el uso del suelo, la cobertura terrestre y las condiciones climáticas regionales, orientado hacia la resiliencia urbana, destaca la importancia de enfoques metodológicos integrados que permiten describir, analizar y modelar estas interacciones con precisión. La incorporación de datos satelitales y registros continuos a escala regional es esencial para realizar diagnósticos locales detallados y para generar escenarios basados en evidencia, claves para la planificación territorial sostenible y la adaptación frente a desafíos climáticos y ambientales.
La definición de indicadores resulta un recurso clave para el diagnóstico, seguimiento y toma de decisiones. Por ejemplo, las superficies absorbentes fueron definidas por el área verde y el suelo desnudo, mientras que las superficies impermeables las conforman aquellos elementos generados por la actividad humana (construcciones y espacios de circulación para el

tránsito). Si bien pueden existir diversos grados de impermeabilidad en estas superficies, es decir, un cierto porcentaje de la superficie sobre la que opera el ciclo natural respecto de la superficie total del área de estudio, aquí se consideraron escenarios categóricos opuestos.

Los resultados indicaron comportamientos opuestos entre la cobertura natural y la superficie antrópica, la primera tendió a disminuir mientras que la segunda aumentó con el transcurso del tiempo. Con relación a esto, se observó pérdida de vegetación debido al avance de la superficie impermeabilizada. Los OG identificados a través de la encuesta satelital se agruparon en categorías y subcategorías del uso de la tierra para facilitar la interpretación de los procesos ambientales. En este caso, se expresó como un aumento o disminución porcentual de la cobertura durante un período de tiempo determinado y se delinearon las zonas dentro de las áreas urbanas del AMBA que han experimentado la mayor pérdida de cobertura natural debido a aumentos antropogénicos de la superficie. El análisis de la variabilidad del territorio mediante los OG para rastrear sus tendencias cambiantes resultó en un procedimiento útil para el diagnóstico local. En una perspectiva regional, la variabilidad de los OG facilitó la detección del período con mayor transformación del uso de la tierra. De 2009 a 2022 la cobertura de áreas naturales disminuyó un 77% debido a un aumento de la superficie antrópica dentro del área urbana del AMBA.

Un aspecto crítico en la implementación de planes de manejo y ordenamiento del territorio es el seguimiento de los cambios en el nivel de provisión de los servicios ecosistémicos con una cobertura completa del territorio. En este sentido, la metodología presentada propone un sistema de seguimiento utilizable para el monitoreo de los cambios en la estructura y función de los elementos del territorio.

Acerca de las variables a monitorear a través del levantamiento satelital, el uso de estimaciones de variables funcionales de los ecosistemas derivadas de la teledetección tiene muchos precedentes en la literatura (Paruelo, Alcaraz-Segura y Volante, 2011; Pettorelli, Vik, Mysterud, Gaillard, Tucker y Stenseth, 2005; Paruelo, 2008; Kerr y Ostrowsky 2003). Un ejemplo es la posibilidad de estimar los flujos de carbono y agua mediante sensores remotos, cuantificando variables de los ecosistemas directamente en grandes áreas sin la necesidad de recurrir a protocolos de extrapolación para mediciones específicas. El NVDI ya se ha aplicado con éxito a la investigación sobre tendencias y variaciones temporales y espaciales en la distribución, productividad y dinámica de la vegetación, para monitorear la degradación y fragmentación del hábitat y los efectos ecológicos de desastres climáticos como sequías o incendios (Pettorelli et al., 2005).

En este trabajo, el NDVI resultó un buen estimador de los servicios ecosistémicos proporcionados por la vegetación.

Otras variables como las amenazas y vulnerabilidades del área fueron monitoreadas, pero no arrojaron resultados, probablemente porque era una escala (regional) diferente a la utilizada en la metodología (local).

El monitoreo satelital por puntos es una herramienta innovadora que consiste en un muestreo territorial en base a interpretaciones visuales del paisaje en imágenes de alta resolución. A fin de profundizar la comprensión de la técnica y las formas de su implementación a escala local/municipal se ejemplificó el uso de las herramientas a través del análisis de las áreas verdes urbanas. Los procedimientos descritos ayudan a conocer y garantizar, por

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

ejemplo, la función ecológica de un área mediante la evaluación del espacio verde urbano dentro y entre las viviendas u otras edificaciones. Del mismo modo, proporciona información sobre los cambios en el número o superficie del elemento del territorio en estudio. La ubicación de estos espacios, sus superficies relativas y su estado de integridad son aspectos fundamentales para combinar estrategias con un enfoque integral y efectivo para el análisis y la reducción del riesgo, entendiendo su contexto geográfico.

Una de las ventajas de este método fue que el análisis estadístico de los datos satelitales se realiza dentro del mismo sistema de programas que recopiló los datos (el sistema de información geográfica está integrado con programas de teledetección y programas estadísticos de las muestras). Al integrar fuentes de datos e información de diferentes orígenes, lo hace muy eficiente a la hora de analizar las métricas del proyecto, lo que se traduce en una mejor gestión y consolidación del sistema de monitoreo. El diseño de muestreo se basó en una grilla de parcelas distribuidas aleatoriamente en toda el área de estudio. Sin embargo, dependiendo de los objetivos del proyecto, el muestreo puede centrarse en determinados aspectos de interés. Entre ellos la oferta de áreas verdes, el monitoreo de medidas de adaptación; el análisis de tendencias de cambio del paisaje, entre otros. El método es fácil y rápido de implementar, y para alcanzar altos niveles de precisión, puede optarse por un gran número de muestras para medir eventos de cambio infrecuentes que no se pueden detectar fácilmente y con precisión en una muestra en el campo. La Tabla 4 describe algunos aspectos relevantes de la metodología.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del procedimiento metodológico

VENTAJAS DEL MONITOREO SATELITAL POR PUNTOS	
Innovación tecnológica	Utiliza imágenes de alta resolución y técnicas de teledetección para un análisis detallado del paisaje.
Eficiencia en el monitoreo	Es fácil y rápido de implementar, permitiendo mejorar la precisión de base de datos a través del número de muestras.
Integración de datos	Disponibilidad de imágenes satelitales de calidad e información climáticas, entre otras.
Identificación de indicadores	Contribuye a identificar datos geográficos útiles como indicadores para el diagnóstico y toma de decisiones.
Estimación de variables ecosistémicas funcionales	Consulta y análisis de datos satelitales provenientes de diferentes sensores posibilita la estimación de parámetros.
Seguimiento de tendencias en los patrones del paisaje	Permite el seguimiento de los diferentes tipos de cobertura y usos de la tierra a lo largo del tiempo.

DESVENTAJAS DEL MONITOREO SATELITAL POR PUNTOS	
Acceso a imágenes satelitales	La calidad de la escena satelital y la disponibilidad de las fechas de las imágenes pueden verse afectadas por condiciones climáticas y técnicas, entre otros.
Costos	En caso de no acceder a imágenes de alta resolución en forma gratuita el análisis de datos pueden ser costosos.
Percepción	La interpretación depende de la sensibilidad del usuario.
Capacitación	Requiere personal entrenado para el manejo de los datos de manera efectiva.

Fuente: elaboración propia.

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

Conclusión

Se identificó que el crecimiento urbano está directamente vinculado al deterioro de los servicios ecosistémicos, afectando funciones críticas como la regulación hídrica, el clima y la calidad del aire. Este análisis subraya la urgencia de estrategias urbanísticas sostenibles que consideren la conservación de áreas verdes y servicios ecológicos indispensables. En este marco, los impactos del crecimiento urbano sobre los servicios ecosistémicos incluyen los siguientes:

1. Pérdida de cobertura natural y aumento de superficie antrópica.
   El crecimiento urbano, representado por el aumento de superficie construida, ha resultado en una disminución significativa de áreas naturales. Esto afecta directamente la provisión de servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, climática y la conservación de la biodiversidad. Un 77% de pérdida de vegetación entre 2009 y 2022 refleja cómo la expansión urbana compromete la salud ecológica del área estudiada.
2. Impacto en la infiltración y regulación hídrica.
   La clasificación de los indicadores de permeabilidad muestra cómo las superficies impermeables asociadas al crecimiento urbano limitan funciones clave del suelo como la infiltración y acumulación de agua. Esto provoca mayores riesgos de inundaciones y altera el ciclo natural del agua, impactando negativamente en los servicios ecosistémicos.
3. Deterioro de servicios ecosistémicos medido por el NDVI.
   En verano de 2022, la correlación alta entre la vegetación y el NDVI mostró que las áreas naturales brindan servicios ecosistémicos óptimos. Sin embargo, en las zonas urbanas, los valores del NDVI son bajos, evidenciando una menor capacidad de intercambio de gases a través de la fotosíntesis y la respiración de las plantas y por ende de brindar servicios esenciales.
4. Fluctuaciones estacionales reducidas en áreas urbanas.
   Las diferencias del NDVI entre verano e invierno fueron menos notables en áreas urbanas debido a la escasa vegetación. Esto indica que los entornos urbanos no sólo carecen de vegetación suficiente, sino que esta vegetación tiene poca capacidad para responder a los cambios estacionales y proveer servicios ecosistémicos.
5. Zonificación de servicios ecosistémicos.
   Los mapas de los NDVI revelan que las áreas periféricas al crecimiento urbano todavía mantienen un alto vigor vegetal, crucial para la provisión de servicios ecosistémicos. Sin embargo, el avance de la urbanización amenaza con reducir aún más estas zonas clave, deteriorando los servicios ecológicos que sustentan la calidad ambiental y la vida en la región.

La identificación de prioridades geográficas en la planificación territorial surge como un aspecto fundamental para optimizar la provisión de servicios ecosistémicos y fortalecer la resiliencia urbana frente a los desafíos ambientales y climáticos. Este enfoque estratégico permite una gestión más eficaz del territorio, impulsando soluciones sostenibles y adaptativas para enfrentar los retos del crecimiento urbano.

La evaluación del impacto ambiental derivado de los cambios en la cobertura y uso del suelo en el AMBA durante el período 2003-2022, permitió caracterizar

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

transformaciones clave en el territorio. A través del uso de herramientas tecnológicas de acceso libre y código abierto, como imágenes satelitales, se analizaron procesos tales como la pérdida de superficie verde, la degradación de la integridad del paisaje y el deterioro del valor ecosistémico, con especial énfasis en la reducción de la permeabilidad del suelo.

Asimismo, se ajustaron procedimientos operativos estratégicos que integran estas tecnologías para el monitoreo ambiental y el análisis geográfico. Este enfoque facilitó el establecimiento de aspectos de los servicios ecosistémicos relacionados con los espacios verdes urbanos, sirviendo como guía para la creación de estándares orientados a la toma de decisiones estratégicas. Estas medidas tienen como objetivo mejorar la calidad de vida y fortalecer la resiliencia urbana frente a los desafíos del crecimiento acelerado.

Finalmente, contribuir a la generación de escenarios basados en evidencia es crucial para respaldar la toma de decisiones estratégicas en programas y proyectos de evaluación y seguimiento ambiental. Este esfuerzo promueve soluciones informadas y fortalece la sostenibilidad y eficacia en la gestión de recursos naturales y entornos urbanos. En vista de la falta de investigaciones que ofrezcan recomendaciones prácticas para orientar a los planificadores urbanos y a los formuladores de políticas, se espera que este enfoque apoye la creación de nuevas políticas públicas en el AMBA y en otras ciudades al ser replicado en diferentes procesos de monitoreo ■

© SI-FADU-UBA | TEMÁTICA GENERAL

REFERENCIAS

Britos, A. Horacio, Barchuk, Alicia (2013). Dinámica de la cobertura vegetal y los usos de la tierra a través de modelos de no-equilibrio. *Revista de Teledetección*, (40), 89-111. http://www.aet.org.es/revistas/revista40/Numero40_08.pdf

Cazorla, Beatriz P.; Cabello, Javier; Reyes, Andrés; Guirado, Emilio; Peñas, Julio; Pérez-Luque, Antonio J. y Alcaraz-Segura, Domingo (2023). A remote-sensing-based dataset to characterize the ecosystem functioning and functional diversity in the Biosphere Reserve of the Sierra Nevada (southeastern Spain). *Earth System Science Data*, *15*(4), 1871-1887. https://essd.copernicus.org/articles/15/1871/2023/essd-15-1871-2023.pdf

Cerrón, Jésica; del Castillo, Juan; Bonnesoeur, Vivien; Peralvo, Manuel y Mathez-Stiefel, Sarah-Lan (2019). *Relación entre árboles, cobertura y uso de la tierra y servicios hidrológicos en los Andes Tropicales: Una síntesis del conocimiento*. Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF)/Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). http://dx.doi.org/10.5716/OP19056.PDF

De Pietri, Diana; Dietrich, Patricia; Carcagno, Alejandro; Boglioli, Silvia e Igarzabal, María Adela (2024, octubre). Monitoreo y seguimiento de las Transformaciones urbanas del AMBA. Mediante herramientas tecnológicas de libre acceso. *Actas Jornadas Si+ Categorías*. FADU-UBA. https://publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/actas/article/view/2768

De Pietri, Diana; Dietrich, Patricia; Carcagno, Alejandro e Igarzabal, María Adela (2023, diciembre). Análisis espacio temporal de la cobertura del suelo y uso de la tierra en Argentina mediante herramientas tecnológicas de libre acceso. *Actas Jornadas SI+ Palabras clave. Conceptos, términos y metadatos*. FADU-UBA. https://publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/actas/article/view/2148

De Pietri, Diana; Dietrich, Patricia; Boglioli, Silvia; Carcagno, Alejandro e Igarzabal, María Adela (2023, octubre). Análisis de los servicios ecosistémicos utilizando datos satelitales. *Jornadas Si+Escalas*. FADU-UBA. https://cim.fadu.uba.ar/jornadas/

De Pietri, Diana; Dietrich, Patricia e Igarzabal, María Adela (2008, octubre). Indicadores ambientales derivados de las transformaciones del uso de la tierra en el Área Metropolitana de Buenos Aires (1985-2001). *AREA*, (14), 67-77. https://area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA14/14_de_pietri_et_al.pdf

Galeana Pizaña, José Mauricio; Corona Romero, Nirani y Ordoñez Díaz, José Antonio Benjamín (2009). Análisis dimensional de la cobertura vegetal-uso de suelo en la Cuenca del Río Magdalena. *Ciencia forestal en México*, *34*(105), 135-156. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000100007&lng=es&tlng=es

Geppert, Sabrina (2022). Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). https://panorama.solutions/es/user/sabrina-geppert

Google Earth Engine-GEE (2018). Google Earth Engine. Google. https://earthengine.google.com

Grupo Interinstitucional de monitoreo de bosques y uso de la tierra-GIMBUT, (2018, agosto). *Protocolo para el uso de la plataforma Open Foris (Collect - Collect Earth - Earth Engine) Aplicado para la actualización de niveles de referencia de emisiones GEI –NREF/NRF- De Guatemala 2001-2016*. Guatemala. https://www.forestcarbonpartnership.org/system/files/documents/Gt ERPD Advanced Draft Anexo IV.pdf

ICLEI Colombia (2023). *Análisis de riesgo y vulnerabilidad climática con enfoque ecosistémico. Villavicencio*. NaBa/ICLEI. https://americadosul.iclei.org/es/documentos/villavicencio-analisis-de-riesgo-y-vulnerabilidad-climatica/

Igarzabal, María Adela y Vidal, Sonia (2004). Área Metropolitana Buenos Aires: Un enfoque desde la planificación urbana. *Geodemos*, (7/8), 77-93.

Jiang, Yitong; Fu, Peng y Weng, Qihao (2015) Evaluación de los impactos del uso de la tierra asociado con la urbanización/cambio de cobertura en la temperatura y humedad de la superficie de la tierra: un estudio de caso en el medio oeste de los Estados Unidos. *Teledetección*, *7*(4), 4880-4898. https://doi.org/10.3390/rs70404880

Kerr, Jeremy T. y Ostrovsky, Marsha (2003). From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, *18*(6), 299-305. https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00071-5

Kozak, Daniel (ed.) (2023). *Soluciones basadas en la naturaleza para ciudades resilientes al cambio climático. Perspectivas y experiencias de América Latina*. PNUMA. https://cityadapt.com/publicacion/sbn-para-ciudades-resilientes-al-cambio-climatico

Leija-Loredo, Edgar G.; Reyes-Hernández, Humberto; Reyes-Pérez, Oscar; Flores-Flores, José L. y Sahagún-Sanchéz, Francisco J. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera y bosques*, *22*(1), 125-140. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712016000100125&lng=es&tlng=es

López Caloca, Alejandra Aurelia; Tapia McClung, Rodrigo y Gómez Fernández, Tania (2021). *Monitoreo de procesos territoriales con imágenes de satélite en escala regional*. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial.

Municipalidad de Curridabat (2019). *Sistema de monitoreo de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas en el cantón de Curridabat*. Municipalidad de Curridabat. https://labmeh.catie.ac.cr/wp-content/uploads/2019/07/Sistema-Monitoreo-Biodiversidad_Curridabat.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2009). Recolección, análisis y reporte de información forestal. Herramientas tecnológicas de libre acceso para contribuir con el inventario nacional forestal y de fauna silvestre del Perú. FAO. http://www.fao.org/3/a-i6740s.pdf

Paruelo, José M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3), 4-22. http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=575

Paruelo, José M.; Alcaraz-Segura, Domingo y Volante, José. (2011). El seguimiento del nivel de provisión de los servicios ecosistémicos [pp. 141-160]. En Pedro Laterra, Esteban G. Jobbágy y José M. Paruelo (eds.), Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y valoraciones para el ordenamiento territorial. INTA.

Pettorelli, Nathalie; Vik, Jon Olav; Mysterud, Atle; Gaillard, Jean-Michel; Tucker, Compton J. y Stenseth, Nils Chr. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution, 20*(9), 503-510. http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011

Pérez Gañan, Rocío (2019). Introducción a la teledetección. Universidad Virtual de Quilmes. La herramienta de la teledetección: el análisis visual y el procesamiento de imágenes. Universidad Nacional de Quilmes. https://static.uvq.edu.ar/mdm/teledeteccion/unidad-3.html

Rouse, John W.; Haas, Robert H.; Schell, Julie A. y Deering, Donald W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *NASA. Goddard Space Flight Center*, *1*, 309-317. https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614