

Comunicación

Visualizar lo invisible: Servicios ecosistémicos en el Área Metropolitana de Buenos Aires

Diana De Pietri; Dietrich, Patricia; Carcagno, Alejandro; Boglioli, Silvia; Manuel Emiliano Moreno Pérez.

dianadepietri@fadu.uba.ar; pdietr@fadu.uba.ar;

acarcagno@yahoo.com.ar; silvia.boglioli@fadu.uba.ar;

317202335@fa.unam.mx

Universidad de Buenos Aires. Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Instituto Superior de Urbanismo, Territorio y Ambiente / Centro de Información Metropolitana. Ciudad de Buenos Aires. Argentina.

Palabras clave

Servicios ecosistémicos, Área Metropolitana de Buenos Aires, Herramientas de teledetección, Plataformas tecnológicas de acceso libre, Planificación territorial.

Resumen

La expansión urbana en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) genera transformaciones profundas en los ecosistemas urbanos, afectando la cobertura vegetal y los servicios ecosistémicos. Este estudio analiza el impacto del crecimiento urbano sobre la vegetación mediante herramientas de teledetección y plataformas tecnológicas de acceso libre como Google Earth Engine y Open Foris.

Se procesó imágenes satelitales multitemporales MODIS, en verano e invierno, aplicando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para evaluar el vigor vegetal. Se relevaron 500 puntos distribuidos en los 40 municipios del AMBA y CABA, clasificando coberturas del suelo y analizando estadísticamente los valores de NDVI.

El análisis confirmó que la cobertura del suelo influye significativamente en los valores del NDVI, pero no es el único factor determinante. La estacionalidad y

el tipo de vegetación tienen un impacto decisivo: en verano se registraron valores más altos de NDVI, reflejando mayor actividad fotosintética, mientras que en invierno estos valores disminuyeron, especialmente en especies caducifolias y cultivos estacionales.

Finalmente, el estudio subraya la importancia de comunicar procesos ambientales complejos mediante mapas temáticos y datos abiertos, promoviendo la participación ciudadana y fortaleciendo la planificación territorial sostenible.

Introducción

La expansión urbana sostenida en regiones metropolitanas constituye uno de los principales motores de transformación del paisaje, generando impactos directos sobre los ecosistemas urbanos y los servicios que estos proveen. En particular, el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), que concentra más de un tercio de la población del país, constituye un escenario privilegiado para el análisis de estos procesos debido a la magnitud de su crecimiento urbano y la diversidad de problemáticas sociales, ambientales y territoriales que allí convergen.

El estudio de la cobertura y el uso del suelo en áreas urbanas contribuye a comprender la configuración del paisaje metropolitano, anticipar tendencias de cambio y orientar políticas públicas hacia un desarrollo más equilibrado y sostenible. En este sentido, la expansión de la superficie construida en el AMBA plantea desafíos relevantes para el diseño de ciudades más habitables, saludables y resilientes, en un contexto donde los cambios en los parámetros biofísicos —temperatura, vegetación y humedad superficial— se intensifican tanto por la urbanización no planificada como por los efectos del cambio climático.

La teledetección se presenta como una herramienta estratégica para abordar estas problemáticas. Mediante la adquisición sistemática de datos de la superficie terrestre desde plataformas espaciales, posibilita una descripción multiescalar y multitemporal de los sistemas urbanos, facilitando la discriminación de coberturas vegetales, usos del suelo y masas de agua, así como la detección de procesos naturales y antrópicos. Entre las metodologías derivadas, el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) constituye un indicador ampliamente validado para estimar el vigor y estado de salud de la vegetación, clave para evaluar funciones ecológicas y servicios ecosistémicos como la regulación climática, la conservación del suelo y el agua, la producción de oxígeno y la calidad del aire.

El presente trabajo, titulado *Visualizar lo invisible: Servicios ecosistémicos en el Área Metropolitana de Buenos Aires*, propone un análisis espacio-temporal de la vegetación en relación con la expansión urbana a partir de imágenes satelitales Modis, entre otras, procesadas en plataformas de acceso libre como Google Earth Engine (GEE) y Open Foris (OF). El enfoque se centra en la

comparación de estaciones climáticas contrastantes —verano e invierno—, con el fin de identificar patrones de cambio y su relación con la dinámica de los servicios ecosistémicos.

Más allá de la generación de conocimiento técnico-científico, este estudio subraya la importancia de la comunicación y la visualización de procesos ambientales complejos a través de mapas temáticos y datos abiertos. De este modo, se busca contribuir no solo a la planificación territorial y la gestión ambiental, sino también a la democratización de la información, promoviendo la participación de investigadores, tomadores de decisiones y ciudadanos en la construcción de ciudades más sostenibles.

Objetivo

Analizar los cambios en la cobertura del suelo y los usos de la tierra en el AMBA mediante imágenes satelitales procesadas con herramientas de acceso libre, para identificar transformaciones urbanas y estimar su impacto sobre los servicios ecosistémicos a través del índice NDVI.

Hipótesis

Se plantea que el incremento de la cobertura vegetal en el AMBA, expresado en porcentajes más altos de vegetación leñosa y herbácea, debería correlacionarse positivamente con valores elevados de NDVI. Sin embargo, esta relación no sería completamente lineal, ya que se espera que la vegetación herbácea mantenga altos valores de NDVI durante el verano por su intensa actividad fotosintética, mientras que las áreas construidas presentarán valores bajos en ambas estaciones, reflejando escasa presencia de vegetación activa. Por lo tanto, se espera que el tipo de cobertura y la estacionalidad influyen significativamente en la variabilidad del NDVI, más allá de la cantidad de superficie vegetada.

Metodología

Este trabajo se realizó en el marco de la pasantía académica del estudiante Manuel Emiliano Moreno Pérez, cuya participación resultó fundamental para el desarrollo de la investigación.

El proyecto se desarrolló mediante una combinación de herramientas tecnológicas de libre acceso y procedimientos metodológicos que permitieron construir una base de datos georreferenciada y representativa del AMBA. El enfoque central integró la plataforma FAO/Open Foris y GEE, lo que posibilitó un trabajo eficiente en la selección, validación y análisis de muestras espaciales, complementado con la interpretación visual de imágenes de Google Earth Pro y el cálculo del NDVI a partir de sensores satelitales (MODIS, Landsat y Sentinel-2). El desarrollo operativo se estructuró en cuatro etapas principales:

Etapa 1. Herramientas tecnológicas y criterios de selección de datos

Se evaluaron las funcionalidades de FAO/Open Foris y GEE, seleccionando escenas satelitales de alta calidad (libres de nubes y errores de píxeles), con resoluciones espaciales y temporales adecuadas para analizar la dinámica urbana y la vegetación. Se consideraron factores como el ciclo de vida de la vegetación, la estacionalidad y la ocurrencia de precipitaciones previas, así como los criterios espectrales, espaciales y temporales necesarios para la interpretación de coberturas y usos del suelo.

Etapa 2. Área de estudio y diseño muestral

El área de estudio comprendió el conjunto de los 40 municipios del AMBA más la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Se generaron 500 puntos de muestreo distribuidos aleatoriamente, cada uno representando 0,5 hectáreas y compuesto por 9 subpuntos de análisis. Esta estrategia permitió garantizar una cobertura representativa de las distintas configuraciones territoriales.

Etapa 3. Relevamiento y clasificación de datos

Para cada punto de muestreo se registraron atributos como coordenadas geográficas, fecha de la escena satelital utilizada, observaciones de campo virtual, y clasificación del uso/cobertura del suelo en categorías: vegetación arbórea, vegetación no arbórea, agrícola, urbano/construido, agua, arbustivo, pastizal, suelo desnudo o virgen. Los valores mínimos y máximos del NDVI fueron calculados para cada muestra, a fin de vincular las clases de cobertura con la dinámica de los servicios ecosistémicos.

Etapa 4. Procesamiento y análisis estadístico

La base de datos resultante se exportó en formato CSV, se depuró y organizó para garantizar su calidad y consistencia. Posteriormente, se aplicaron técnicas estadísticas descriptivas (medidas de tendencia central, dispersión y percentiles) y se elaboraron diagramas de cajas y bigotes para visualizar la relación entre coberturas, usos de suelo y valores de NDVI. Esta integración metodológica permitió identificar patrones espacio-temporales en la transformación de la cobertura vegetal y su vínculo con la urbanización del AMBA.

Desarrollo

El relevamiento de datos se realizó mediante interpretación visual sobre imágenes de Google Earth Pro (versión 7.3.48642, 64 bits) correspondiente a las fechas más recientes que se tenían a disposición, fueron entre los periodos de tiempo de 2022 al primer semestre del 2025.



Luego, se registraron los siguientes atributos por cada uno de los 500 puntos de muestreo:

- Número de encuesta
- Sistema de coordenadas utilizado
- Coordenadas geográficas (X, Y)
- Fecha de la imagen satelital interpretada
- Observaciones o comentarios sobre estadísticas particulares del sitio analizado
- Clasificación del uso del suelo según las siguientes variables: Forestal, agrícola, urbano, arbustivo, pastizal, suelo virgen.
- Valores mínimos y máximos del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) para cada muestra

La totalidad de la base de datos fue generada a partir de la revisión detallada y manual de cada punto, completando las 500 encuestas previstas. Posteriormente, los datos fueron exportados en formato CSV para su limpieza y organización preliminar, etapa fundamental para garantizar la calidad del análisis posterior.

Análisis

Durante el invierno, el NDVI promedio descendió a 4.55, con una moda de 4.56 y una mediana de 4.79, reflejando la disminución natural de la actividad fotosintética típica de esta época del año, el 50% central de los valores se encuentra entre 4.18 y 5.17, mostrando una distribución más estrecha.

Este comportamiento describe una relación positiva entre el porcentaje de cobertura verde y el vigor de la vegetación, con mayor impacto durante el verano, cuando la actividad fotosintética alcanza sus máximos anuales.

El análisis estadístico descriptivo de los valores de NDVI, segmentados según las diferentes clases de cobertura del suelo, contribuyó a obtener los siguientes

resultados generales:

- Vegetación arbórea: Presenta los valores más altos de NDVI en ambas estaciones, tanto en términos de media como de mediana. Esto confirma su alta densidad y vigor vegetativo, con una respuesta fotosintética sostenida a lo largo del año.
- Vegetación no leñosa: Registra valores intermedios de NDVI, con una mayor dispersión. Esta variabilidad se debe a diferencias en la densidad, tipo de especies y fenología, lo que refleja una respuesta menos homogénea frente a las condiciones estacionales.
- Áreas construidas y suelo desnudo: Exhiben los valores más bajos de NDVI, con valores cercanos a dos. Esto indica una escasa o nula presencia de vegetación activa, independientemente de la estación del año.
- Moda del NDVI: En zonas con mayor cobertura vegetal, la moda se ubica en rangos medios y altos, mientras que en áreas urbanizadas y suelos desnudos se concentra en valores bajos, reforzando la relación entre cobertura y productividad vegetal.

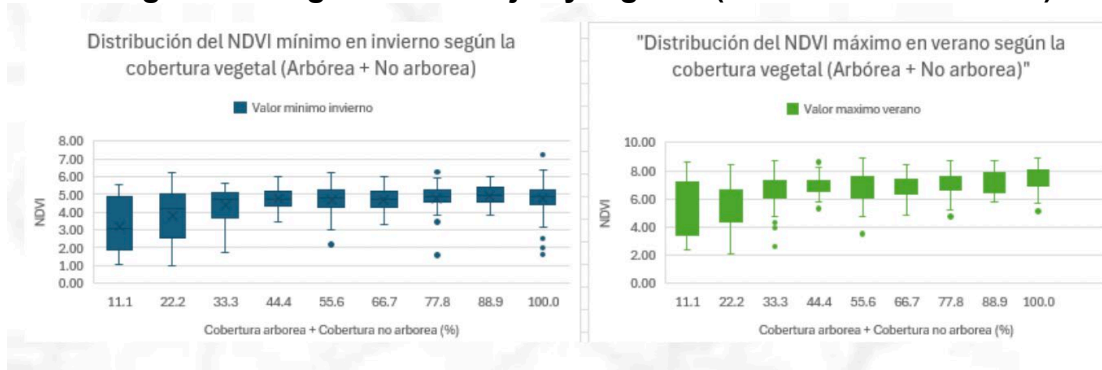
Análisis de los diagramas de cajas y bigotes (arbórea + no arbórea)

Los diagramas de cajas y bigotes (box-plots) muestran la distribución y variabilidad de los valores de NDVI en función de la cobertura vegetal (suma de vegetación arbórea y no arbórea) en dos momentos estacionales: mínimos en invierno y máximos en verano. (figura1)

En ambos casos se observa una tendencia creciente: a medida que aumenta el porcentaje de cobertura vegetal, los valores de NDVI se incrementan. Sin embargo, destaca la presencia de valores extremos – outliers- hacia valores bajos en rangos intermedios de cobertura, especialmente en invierno, lo que indica la existencia de zonas con menor vigor vegetativo incluso dentro de clases con cobertura moderada o alta.

En verano, los valores de NDVI son más elevados y muestran una menor dispersión en los niveles altos de cobertura, evidenciando la respuesta positiva de la vegetación durante la estación de mayor actividad fotosintética, esto se ve en los diagramas, que, aunque tienen comportamientos similares, en invierno alcanza un promedio de 4.5 y en verano de 6.9.

Estos patrones refuerzan la relación entre cobertura y productividad vegetal, pero también sugieren que no toda área cubierta por vegetación tiene el mismo comportamiento ecológico, lo que abre la puerta a análisis más detallados sobre la calidad, estructura y salud de la vegetación urbana en el AMBA.

Figura 1: Diagramas de cajas y bigotes (arbórea + no arbórea)

Elaboración propia

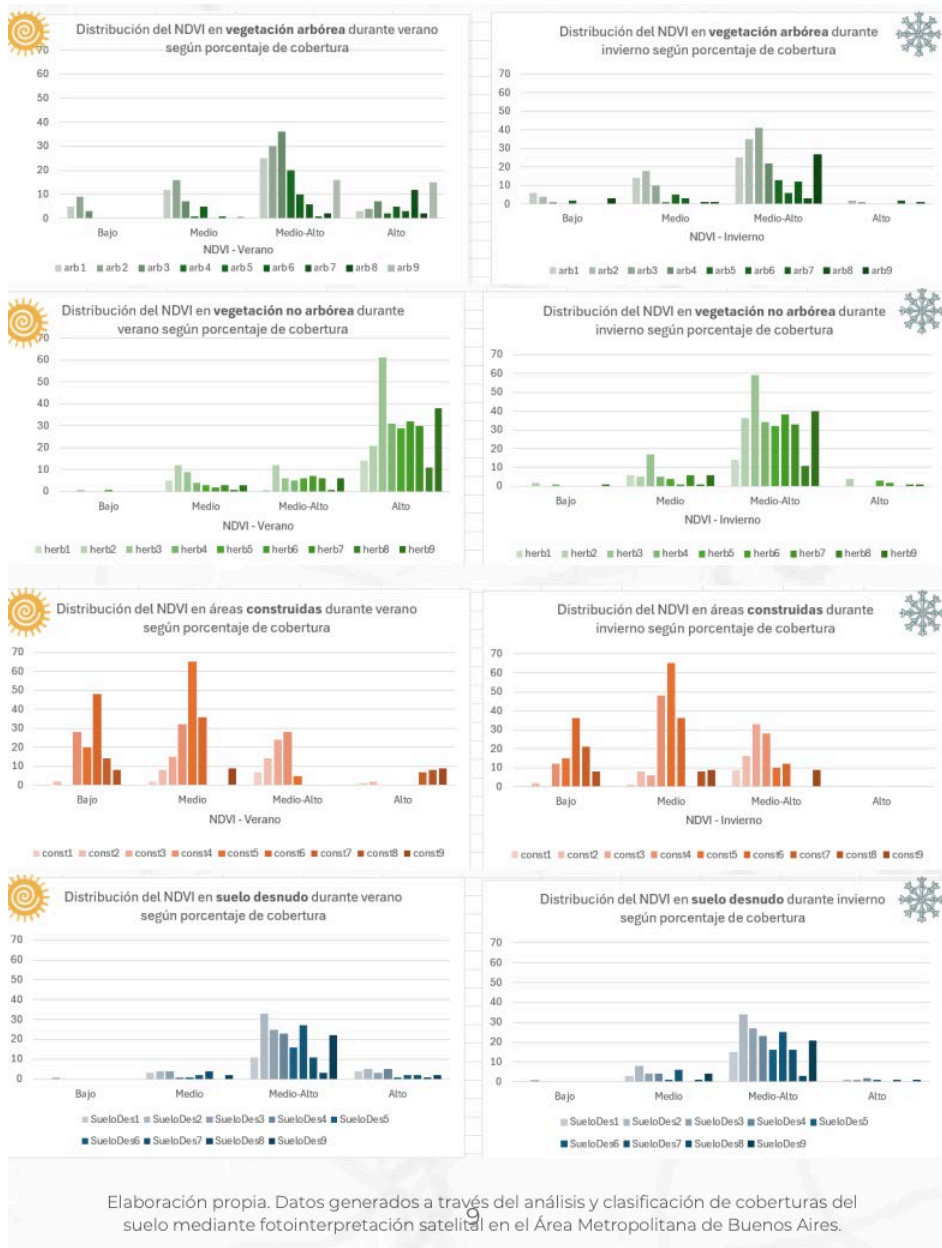
Variación estacional del NDVI en función del porcentaje de cobertura: análisis por clases de cobertura del suelo

Los histogramas muestran diferencias estacionales claras entre el verano y el invierno en el AMBA. A continuación, se presentan la distribución del NDVI en diversas coberturas en verano e invierno. (Figura 2)

En el caso de la vegetación arbórea, durante el verano la mayoría de las muestras presentan valores de NDVI en rangos medio -alto, independientemente del porcentaje de cobertura. En invierno, aunque se mantiene una tendencia similar, disminuye el número de muestras con valores NDVI altos, evidenciando una respuesta estacional propia de especies caducifolias que pierden follaje.

En cuanto a la vegetación no arbórea, la diferencia entre estaciones es más marcada. En verano predominan los valores NDVI altos en prácticamente todos los niveles de cobertura, lo que indicaría presencia de vegetación no arbórea perenne o cultivos en actividad. Sin embargo, en invierno la distribución se concentra mayormente en valores medios y medio -altos, lo que sugiere una reducción del vigor fotosintético, posiblemente debido a especies estacionales o inactividad agrícola.

Figura 2: Variación estacional del NDVI en función del porcentaje de cobertura



Elaboración propia

Finalmente, en las áreas construidas, tanto en verano como en invierno, el NDVI se concentra principalmente en valores bajos y medios, sin variaciones significativas entre estaciones. Esto confirma que el NDVI es un indicador confiable para diferenciar zonas vegetadas de superficies urbanizadas, que reflejan poca actividad fotosintética durante todo el año.

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian el papel determinante de la estacionalidad en la respuesta espectral de la vegetación urbana. Durante el verano, los valores más altos de NDVI reflejan un incremento en la biomasa activa, especialmente en la vegetación no arbórea, cuya actividad fotosintética se intensifica en esta estación. Este comportamiento se mantiene incluso en áreas con baja cobertura, lo que indica que el tipo de vegetación —más que la cantidad de superficie cubierta— tiene un impacto decisivo en la productividad vegetal.

En invierno, la disminución general del NDVI confirma la influencia de especies caducifolias, que pierden follaje, y la menor actividad agrícola, lo que reduce significativamente la respuesta espectral. Aun así, en algunos rangos, la vegetación no arbórea mantiene valores superiores a los de la vegetación leñosa, posiblemente por la presencia de especies resistentes al frío o cultivos invernales.

Este análisis demuestra que el NDVI es una herramienta eficaz para detectar dinámicas estacionales y diferenciar tipos de cobertura, pero también revela que su comportamiento no siempre guarda una relación lineal con el porcentaje de cobertura vegetal. Factores como la salud de la vegetación, la diversidad de especies y el contexto fenológico influyen considerablemente en los resultados, lo que exige una interpretación crítica y contextualizada de los datos satelitales.

Conclusiones

- La cobertura del suelo es un factor clave en la respuesta espectral de la vegetación medida mediante NDVI. Sin embargo, no es el único determinante: el tipo de vegetación y la estacionalidad influyen significativamente en los resultados.
- La estacionalidad tiene un impacto decisivo: durante el verano se registraron valores más altos de NDVI en todas las coberturas vegetales, reflejando una mayor actividad fotosintética. En invierno, estos valores disminuyeron, especialmente en la vegetación no arbórea, afectada por la caída de follaje y la menor actividad agrícola.
- La vegetación herbácea mostró NDVI elevados incluso con baja cobertura, lo que evidencia la influencia de especies perennes o cultivos activos. Esto sugiere que la calidad y el tipo de vegetación pueden superar el efecto de la cantidad de superficie cubierta.
- La resolución espacial del sensor MODIS (250 m) permite captar tendencias generales, pero introduce limitaciones a escala local. La mezcla de coberturas dentro de un mismo píxel puede generar sesgos, especialmente en áreas urbanas con vegetación dispersa.
- La interpretación del NDVI debe considerar la fenología y la heterogeneidad de la cobertura, ya que estos factores condicionan la lectura espectral y pueden afectar la precisión del análisis espacial.

Bibliografía

- Argentina. Archivo General de la Nación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado en https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_alicia_barchuk_0.pdf
- Britos, A; Barchuk, A (2013) Dinámica de la cobertura vegetal y los usos de la tierra a través de modelos de no-equilibrio. Asociación Española de Teledetección. Revista de Teledetección 40. Recuperado el 20/07/2023 en http://www.aet.org.es/revistas/revista40/Numero40_08.pdf
- Cerrón J, del Castillo J, Bonnesoeur V, Peralvo M, Mathez-Stiefel S L. 2019. "Relación entre árboles, cobertura y uso de la tierra y servicios hidrológicos en los Andes Tropicales: Una síntesis del conocimiento". Occasional Paper No. 27
- Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina, CONDESAN. Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF). Lima, Perú. (DOI: <http://dx.doi.org/10.5716/OP19056.PD>. Recuperado el 20/07/2022 en: https://condesan.org/wpcontent/uploads/2019/09/20190918_Arboles_agua_Andes_Imprenta.pdf
- De Pietri, D. et all (2022) Centro de Información Metropolitana, Universidad de Buenos Aires Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Recuperado el 20/07/2023 de: <https://cim.fadu.uba.ar/jornadas/>
- De Pietri, D. et all (2008) Indicadores ambientales derivados de las transformaciones del uso de la tierra en el área metropolitana de Buenos Aires (1985-2001) AREA14: pág. 67
- Geppert S (2022) Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) Recuperado el 20/07/2023 de: <https://panorama.solutions/es/user/sabrinageppert>
- Google Earth Engine (2018) Google Earth engineearthengine.google.com Edwin Ángeles Paredes (2015) Herramientas Open Foris. Módulo de Inventarios – SNIFFS Lima -Perú https://www.academia.edu/12129843/HERRAMIENTAS_OPEN_FORIS
-

- Grupo Interinstitucional de monitoreo de bosques y uso de la tierra. Protocolo para el uso de la plataforma Open Foris (2016). Collect Earth - Earth Engine. Guatemala, (2018 Agosto)
<https://www.forestcarbonpartnership.org/system/files/documents/Gt%20ERPD%20Advanced%20Draft%20Anexo%20IV.pdf> www.openforis.org
- Jiang Y; Fu P; Weng Q. 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 . 2015; 7(4):4880-4898.
<https://doi.org/10.3390/rs70404880>
- Le et al. (2008) y por Le et al. (2010) Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos Vietnam y Ghana a nivel de cuencas.
- Loredó, L; Reyes, E; Hernández, H; Reyes-Pérez, O; Flores-Flores, J., & Sahagún-Sánchez, F. (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. Recuperado el 23/10/2020, de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712016000100125&lng=es&tlng=es.
- Municipalidad de Curridabat .(2019). Sistema de monitoreo de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas en el cantón de Curridabat. Curridabat-Costa Rica. Recuperado el 20/07/2023 de: https://labmeh.catie.ac.cr/wpcontent/uploads/2019/07/Sistema-Monitoreo-Biodiversidad_Curridabat.pdf.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAO. 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. 2009.
<http://www.fao.org/3/a-i6740s.pdf>
- Pérez Gañan, R. (2019) Introducción a la teledetección. Universidad Virtual de Quilmes. Recuperado el 20/07/2023 de: <https://static.uvq.edu.ar/mdm/teledeteccion/unidad-3.html>
- Pizaña, G; Mauricio, J; Romero, C; Nirani, & Díaz, O; Benjamín, J. (2009). Análisis dimensional de la cobertura vegetal-uso de suelo en la Cuenca del Río Magdalena. Ciencia forestal en México, 34(105), 135-156. Recuperado el 23/10/2020 de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000100007&lng=es&tlng=es.
- Rodríguez ,Cruz, Yunier, & Pinto, M. (2018). Modelo de uso de información para la toma de decisiones estratégicas en organizaciones de información. Transinformação, 30(1), 51-64. Recuperado el 20/07/2023 en: <https://doi.org/10.1590/2318-08892018000100005>

- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1974) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium Nasa, Nasa SP-351, Washington DC, 309-317.