

Evolución espacio-temporal de las unidades de ordenamiento ambiental (ZPB, ZPAES) y el refugio de vida silvestre de Los Pantanos de Villa, Perú (1987-2022)

Elveis Daniel Fabian Tolentino

Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur

ORCID: 0000-0003-3356-0576

Nina Aleli Torres Cordero

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

ORCID: 0009-0007-6365-6647

María Fernanda Bardales Martínez

Universidad Científica del Sur

ORCID: 0009-0002-8898-1386

Dagnert Luis Naquiche Yesquen

PROHVILLA -Pantanos de Villa

ORCID: 0000-0003-4253-808X

Dámaso Wilfredo Ramirez Huaroto

Universidad Científica del Sur

ORCID: 0000-0003-4605-9422

Resumen: Los humedales costeros adyacentes a zonas urbanas, como los Pantanos de Villa en la ciudad de Lima, Perú, están sujetos a cambios constantes en el uso del suelo debido a la interacción antropogénica. Esto ha llevado a la reducción de áreas de vegetación densa, dando paso a zonas edificadas. Por esta razón, el presente artículo aborda la problemática de los cambios físicos experimentados en las zonas urbanas adyacentes al humedal, como las unidades de ordenamiento ambiental, en este caso la Zona de Protección de Afloramiento y Escorrentía Superficial (ZPAES) y la Zona de Protección Paisajística de Borde (ZPB), así como el Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa (RVSPV), como consecuencia de la rápida expansión urbana. Por ello, el objetivo de esta investigación es

analizar la evolución espacial y temporal del entorno de los Pantanos de Villa y la urbanización dentro de las Unidades de Ordenamiento Ambiental ZPB, ZPAES y el RVSPV. Para ello, se utilizó la plataforma de Google Earth Engine (GEE) y se procesaron imágenes satelitales de los sensores Landsat 5 TM y Sentinel 2 MSI. Estas imágenes se trabajaron en la interfaz de GEE y se analizaron utilizando índices espectrales, NDVI y NDBI, mediante códigos de álgebra de mapas y el enmascaramiento de píxeles. Para la representación cartográfica, se empleó un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados muestran un aumento del 291.12% en la superficie edificada y una reducción del 26% en la superficie vegetal en los últimos 35 años, para las Unidades de Ordenamiento Ambiental ZPB y ZPAES, y el RVSPV. La reducción identificada se relaciona directamente con la expansión no planificada de la superficie urbana y las actividades antropogénicas.

Palabras clave: NDVI. NDBI. Uso de suelo. Humedal. Índices espectrales.

Space-time evolution of the environmental management units (ZPB, ZPAES) and the wildlife refuge of Los Pantanos de Villa, Peru (1987-2022)

Abstract: Coastal wetlands adjacent to urban areas, such as the Pantanos de Villa in the city of Lima, Peru, are subject to constant changes in land use due to anthropogenic interaction. This has led to the reduction of dense vegetation areas, giving way to built-up areas. Therefore, this article addresses the issue of the physical changes experienced in urban areas adjacent to the wetland, such as the environmental management units, in this case the Zone of Protection of Outcrop and Surface Runoff (ZPAES), and the Zone of Landscape Protection of Edge (ZPB), as well as the Pantanos de Villa Wildlife Refuge (RVSPV), as a result of rapid urban expansion. Therefore, the objective of this research is to analyze the spatial and temporal evolution of the Pantanos de Villa environment and urbanization within the Environmental Management Units ZPB, ZPAES, and RVSPV. To achieve this, the Google Earth Engine (GEE) platform was used, and satellite images from Landsat 5 TM and Sentinel 2 MSI sensors were processed. These images were worked on in the GEE interface and analyzed using spectral indices, NDVI

and NDBI, through map algebra codes and pixel masking. For cartographic representation, a Geographic Information System (GIS) was used. The results show a 291.12% increase in built-up area and a 26% reduction in vegetated area over the last 35 years, for the Environmental Management Units ZPB and ZPAES, and the RVSPV. The identified reduction is directly related to unplanned expansion of urban areas and anthropogenic activities.

Keywords: NDVI. NDBI. Land use. Wetland. Spectral indices.

Elveis Daniel Fabian Tolentino

Egresado de la carrera de Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (UNTELS). Experto en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), cartografía base y temática. Actualmente, se desempeña como pasante en la Oficina de Fiscalización y Control - Pantanos de Villa.

Correo: edfabiantolen@gmail.com

Nina Aleli Torres Cordero

Estudiante de Pregrado de la carrera de Geografía en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Investigadora independiente con enfoque en la exploración y comprensión de los aspectos geográficos en pro de la conservación de los recursos naturales (RRNN).

Correo: nina.torres@unmsm.edu.pe

María Fernanda Bardales Martínez

Estudiante de Pregrado de la carrera de Ingeniería Ambiental en la Universidad Científica del Sur. Actualmente, se desempeña como pasante en la Oficina de Fiscalización y Control - Pantanos de Villa.

Correo: mfbardalesm71@gmail.com

Dagnert Luis Naquiche Yesquen

Ingeniero ambiental titulado por la Universidad César Vallejo (UCV). Actualmente se desempeña como especialista ambiental en la Oficina de Fiscalización y Control de PROHVILLA. Además, ha contribuido con una publicación científica y forma parte del equipo de investigación de PROHVILLA.

Correo: Dnaquichey@ucvvirtual.edu.pe

Dámaso Wilfredo Ramirez Huaroto

Magíster en Biodiversidad en Áreas Tropicales y su Conservación por la Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Biólogo con especialidad en Botánica por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Actualmente, es docente e investigador en la Universidad Científica del Sur y coordinador de investigación de la carrera de Ingeniería Ambiental.

Correo: dramirez@cientifica.edu.pe

1. Introducción

La expansión de las áreas urbanas ubicadas en los ecosistemas de humedales costeros ha conllevado a una notable disminución de su superficie, generando así modificaciones en la vegetación circundante (Urbina et al., 2022). En la actualidad, la pérdida de humedales continúa acarreando impactos desfavorables y tangibles tanto en los ecosistemas como en las comunidades humanas (Gardner & Finlayson, 2018).

Es por ello que la Convención Ramsar asigna sitios específicos de humedales en todo el mundo para su uso sostenible. Debido a su complejidad para clasificarlos en categorías, estos humedales se definen de forma amplia como extensiones pantanosas naturales, artificiales, dulces, saladas, temporales y permanentes (Ramsar, 2021). Además, presentan una diversidad considerable de ecosistemas y cumplen un papel esencial como corredores biológicos para las aves migratorias, ya que sin la presencia de estos ecosistemas estas aves no podrían completar su ciclo de vida (Gardner & Davidson, 2011). También es importante resaltar que la preservación de los diversos tipos de humedales, incluyendo aquellos ubicados en zonas costeras, contribuye significativamente a la mitigación de los impactos del cambio climático, según la evidencia de algunos estudios (León Sulca, 2020; Ramsar, 2021).

En el Perú, se encuentran numerosos humedales ubicados en las vertientes del Pacífico, Atlántico y el lago Titicaca, con una estimación preliminar de 80 000 km², de los cuales 13 sitios forman parte de la Convención Ramsar (decreto supremo 004-2015-MINAM). Los Pantanos de Villa es el único humedal dentro de Lima Metropolitana y pertenece al corredor biológico del Pacífico Sur. Estos entornos húmedos desempeñan un rol esencial en la promoción de actividades económicas y en el sustento de las comunidades locales (Flores et al., 2020). A pesar del arduo trabajo por parte de la Oficina de Fiscalización y Control de PROHVILLA en su conservación y vigilancia, los Pantanos de Villa presentan

grandes problemas ambientales, paisajísticos y socioeconómicos, generados por la falta de planificación a nivel de territorio, social y paisajístico. La mayoría de los humedales costeros, como es el caso de los Pantanos de Villa, se encuentran ubicados dentro o cerca de las ciudades, lo que ocasiona una presión antrópica aún mayor. Sin embargo, este ecosistema brinda múltiples servicios al entorno urbano. Entre estos beneficios se incluyen la purificación del aire, la regulación del microclima, la reducción del ruido, el tratamiento de aguas residuales y la provisión de espacios para la recreación (Bolund & Hunhammar, 1999).

En este contexto, la problemática abordada en esta investigación es la evolución espacio temporal del humedal y su entorno urbano, específicamente de sus Unidades de Ordenamiento Ambiental (UOA): Zona de Protección Paisajística de Borde (en adelante, ZPB) y Zona de Protección de Afloramiento y Escorrentía Superficial (en adelante, ZPAES), y el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (en adelante, RVSLPV), ubicados en el desierto costero del pacífico al sur de la ciudad de Lima, en la antigua carretera de la Panamericana Sur. Según el diagnóstico, esta Área Natural Protegida ha experimentado una pérdida del 17% de sus áreas vegetales entre 2008 y 2018, siendo el gramadal la unidad vegetal más afectada por esta reducción (Flores et al., 2020).

Una forma de comprender estas variaciones temporales es mediante el análisis de herramientas como la teledetección. El uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI) en humedales costeros, como el RVSPV, nos permite evaluar las condiciones de la vegetación y la expansión de áreas urbanas construidas. A pesar de contar con numerosos estudios, el RVSPV carece de evaluaciones detalladas sobre las variaciones de la vegetación y la expansión de áreas urbanas dentro de las UOA y el RVSPV. Estos datos son importantes porque permiten evaluar los cambios temporales, lo que a su vez facilita una mejor gestión del recurso examinado (Beltrán, 2017).

2. Metodología

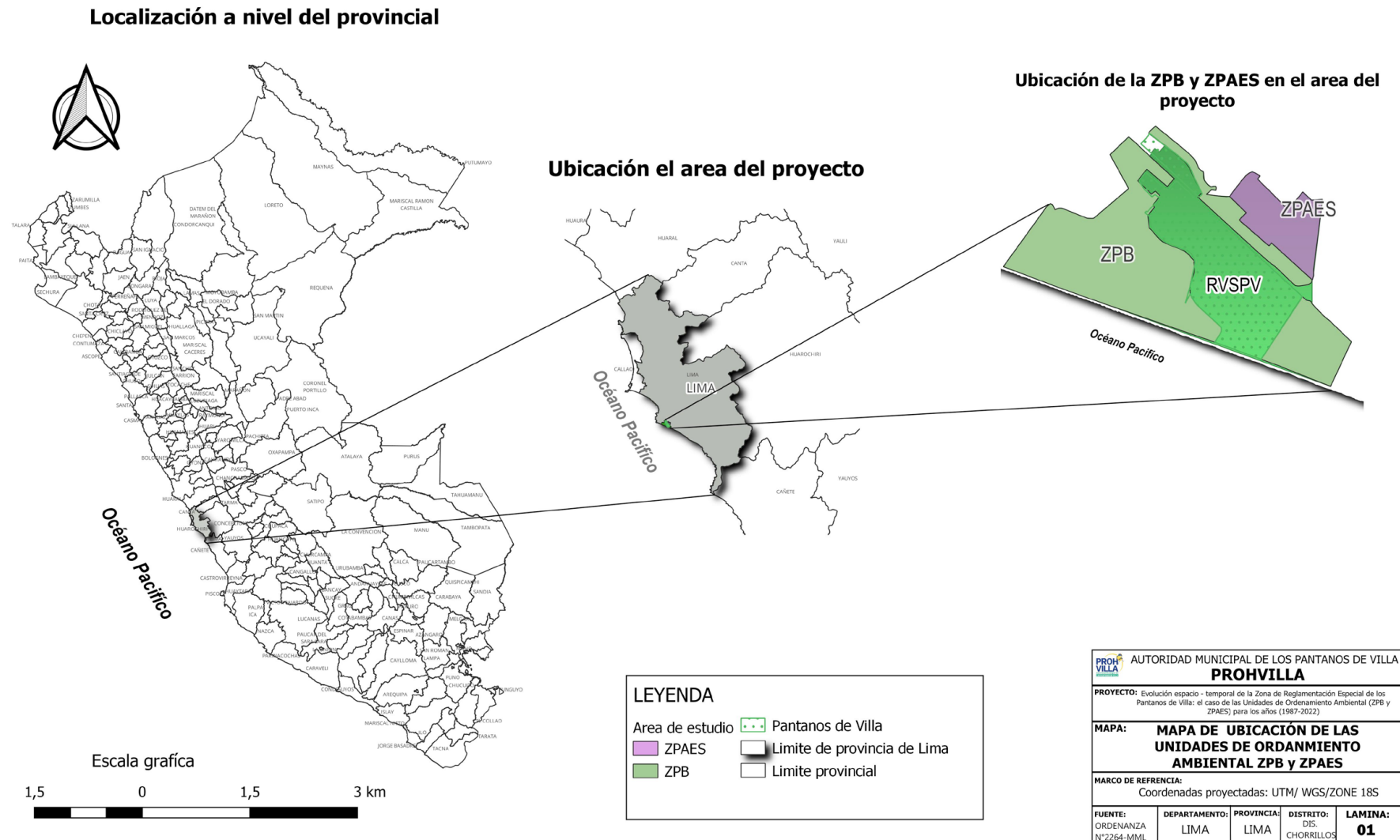
2.1 Área de estudio

Los Pantanos de Villa se encuentran ubicados al sur de la ciudad de Lima, en el distrito de Chorrillos, provincia de Lima, entre 12° 12' 30" L.S. y 76° 59' 20" L.W., con una altitud que varía de 0 a 5 m s. n. m. El área de estudio trazada abarca 8.48 km², de los cuales solo 2.63 km² (según el decreto supremo 055-2006-AG) pertenecen al RVSPV (ver Figura 1).

Las Unidades de Ordenamiento Ambiental (UOA) de la Zona de Reglamentación Especial Pantanos de Villa (ZRE PV) fueron aprobadas mediante la ordenanza 2264-MML, la cual presenta ocho UOA, según lo establecido en el artículo 9 de dicha ordenanza. Estas unidades tienen como objetivo delimitar el uso del suelo y el manejo ambiental que se deberá aplicar, siendo gestionadas por la Autoridad Municipal de los Pantanos de Villa (PROHVILLA). Cabe destacar que el RVSPV no forma parte de ninguna UOA debido a que el RVSPV constituye su propio entorno territorial.

Además, la ZRE PV incluye la Zona de Amortiguamiento (ZA), la cual es definida por el Servicio Nacional de Áreas Protegidas por el Estado (Sernanp). Por lo tanto, esta investigación aborda dos Unidades de Ordenamiento Ambiental: la Zona de Protección Paisajística de Borde (ZPB) y la Zona de Protección de Afloramiento y Escorrentía Superficial (ZPAES), así como el Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa (RVSPV).

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio



Elaboración Propia basada en la ordenanza 2264, Instituto Geográfico Nacional (IGN). Ubicación de las Unidades de Ordenamiento Ambiental ZPB y ZPAES, así como el RVSPV. ZPB: Zona de Protección Paisajística de Borde. ZPAES: Zona de Protección de Afloramiento de Escorrentía Superficial. RVSPV: Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa.

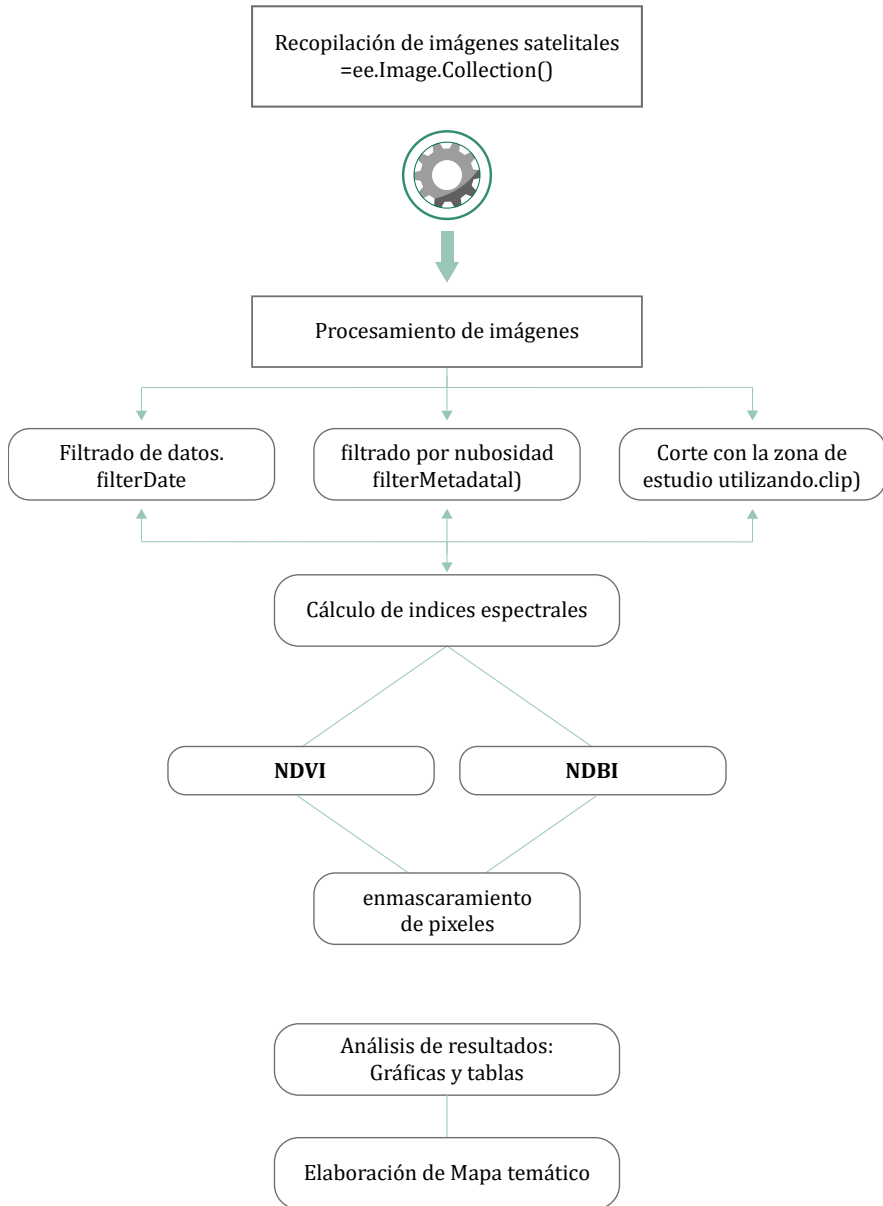
2.2 Método

El diseño metodológico se basó en la aplicación de la teledetección y el Sistema de Información Geográfica, mediante un análisis detallado de imágenes satelitales Landsat 5 TM y Sentinel-2 MSI en la plataforma de Google Earth Engine (GEE). La adquisición de las imágenes fue para los periodos de 1987-2022 (ver Tabla 1). Los años determinados se debieron a la cantidad de imágenes encontradas mediante el filtro de fechas, el filtro de cobertura de nube de 8% y elementos reductores, los cuales siguieron las recomendaciones de Solórzano & Perilla (2022), con el fin de obtener una imagen de calidad y poder analizar el crecimiento urbano en el periodo de tiempo establecido.

Asimismo, se comenzó con la recopilación de las imágenes satelitales, de acuerdo con el periodo establecido, en Google Earth Engine (GEE). Para definir el área de estudio en GEE, se cargó un archivo en formato shapefile (.shp). Posteriormente, se cargaron colecciones de imágenes Landsat 5 (para el periodo 1987-2011) y Sentinel 2 (para el periodo 2016-2022), con el fin de aplicar filtros por periodo y cobertura de nube, y finalmente descargar las imágenes en formato GeoTIFF proyectado en el sistema de coordenadas UTM del datum WGS84 de la zona 18S. Cabe resaltar que GEE realiza las correcciones necesarias para el pre y post-procesamiento.

Para determinar el cambio de cobertura vegetal se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), mientras que para el índice urbanístico se empleó el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI) (ver Tablas 2 y 3). Finalmente, una vez obtenidos los resultados a través de los índices espectrales, se llevó a cabo los análisis finales, los cuales fueron representados mediante gráficos y tablas, con el propósito de elaborar el mapa temático (ver Figura 2).

Figura 2. Flujo metodológico del trabajo



2.2.1 Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Para determinar el cambio de uso del suelo para la vegetación, se realizó el cálculo del NDVI en el interfaz de GEE, mediante el código de Álgebra de Mapas de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$$

El rango de valores del NDVI varía de -1 a 1 (-1 a 0 representa nula vegetación y 0 a 1 representa una vegetación frondosa), según la clasificación propuesta por Mohamed Eid et al. (2020). Para esta investigación, se realizó un enmascaramiento de píxeles mayores de 0.4 a 1, de esta manera se determinó como vegetación saludable valores dentro de este rango (Tabla 2).

2.2.2 Cálculo del Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI)

Para determinar las áreas edificadas se realizó el cálculo del NDBI en el interfaz del GEE, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$NDBI = (SWIR-NIR) / (SWIR+NIR)$$

Los rangos de valores del NDBI varían de -1 a 1. Los valores de -1 a 0 indican presencia de vegetación, mientras que los valores intermedios (0-0.6) comienzan a determinar zonas desnudas, cultivos en crecimiento o zonas en fase de construcción, a medida que adquieren valores de tendencia positivas elevados (0.6 - 1) indica zonas territoriales con coberturas de suelo edificadas o infraestructuras antropogénicas (Rosell & Vicente, 2016).

Tabla 1. Uso de imágenes satelitales de acuerdo con el área de estudio de los Pantanos de Villa (ZPB, ZPES y el RVSPV), periodo 1987-2022

Colección de imágenes	1987	1995	2000	2005	2011	2016	2018
Landsat 5 TM	1987-07-27	1995-05-14	2000-08-15	2005-04-07	2011-03-07		
Sentinel 2 MSI						2016-04-12	2022-05-07

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Clasificación del NDVI aplicado a las imágenes satelitales Landsat 5 TM (1987-2011) y Sentinel - 2 MSI (2016-2022)

Valor del NDVI	Clasificación
-1 a 0	Cuerpo de agua o suelo sin vegetación
0 a 0.4	Vegetación escasa
0.4 a 0.6	Vegetación moderada
0.6 a 1	Vegetación densa

Fuente: Basado en Mohamed Eid et al. (2020).

Tabla 3: Clasificación del NDBI aplicado a las imágenes satelitales Landsat 5 TM (1987-2011) y Sentinel - 2 MSI (2016-2022)

Valor del NDVI	Clasificación
-1 a 0	Presencia de vegetación
0 a 0.6	Zonas desnudas
0.6 a 1	Zonas en fase de construcción

Fuente: Basado en Rosell & Vicente (2016).

3. Resultados

De forma general se muestra un retroceso en la cobertura vegetal de los Pantanos de Villa en los últimos 35 años, alcanzando en el año 2022 una superficie de 32.9% del área total de estudio (8.48 km²). Inicialmente, en el año 1987, esta área contaba con una superficie de 44.5% del área total de estudio, generando una variación temporal de -26. % (2.8km²) de pérdida en la densidad vegetal, la cual se puede asociar con el crecimiento demográfico, el sobrepastoreo (caballos) y la mala disposición de residuos sólidos, factores que generan una pérdida en la cobertura vegetal. Los resultados generados a partir del análisis de las imágenes satelitales, para la evolución espacial y temporal de los Pantanos de Villa y de las Unidades de Ordenamiento Ambiental (ZPB y ZPAES) para el periodo de 1987 a 2022, se pueden observar en las Figuras 3 y 4, así como en la Tabla 4.

Asimismo, para comprender las causas y el impacto que genera la compactación demográfica en los humedales, es necesario realizar el análisis del crecimiento urbano y las zonas edificadas mediante el NDBI. A partir del año 1987, se tenía una superficie edificada del 5.08% del área de estudio (8.48 km²), la cual fue creciendo en los años posteriores. Experimentando un cambio drástico entre los años 2000 y 2005, pasando del 7.7% al 14.8%, casi duplicando la superficie edificada para el entorno urbano de los Pantanos de Villa. Para el año 2022, se tenía una superficie de 1.69 km², que representaba el 19.9% del área de estudio. Esto generó una tasa de variación temporal del año base 1987 al 2022 de más del 292.2% de área sin presencia de vegetación o superficies edificadas.

Tabla 4: Cambio multitemporal de superficie vegetal y crecimiento urbano en km² para las UOA de los Pantanos de Villa (ZPB, ZPAES) y el RVSPV, periodo 1987-2022

Año	AV(NDVI) km ²	%	AC(NDBI) km ²	%
1987	3.77	44.5	0.43	5.1
1995	2.75	32.4	0.44	5.2
2000	3.48	41.1	0.65	7.7
2005	2.77	32.7	1.26	14.8
2011	3.04	35.9	1.39	16.4
2016	2.89	34.1	1.57	18.5
2022	2.79	32.9	1.69	19.9
TV1987-2022		-26.0		+292.2

Nota. Elaboración Propia. %: porcentaje generado a partir del área total (8.48 km²). AV (NDVI): Área de vegetación a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. AC (NDBI): Área de Crecimiento Urbano a partir del Índice de Diferencia Normalizada Edificada. TV (1987-2022): Tasa de Variación multitemporal 1987-2022.

La variación multitemporal de la cobertura vegetal y las zonas construidas de la ZPB, ZPAES y RVPV fue evaluada para cada año, como se presenta en la Tabla 5. Estas variaciones muestran patrones muy similares a los descritos para el área total trazada, evidenciando un mayor crecimiento en la UOA ZPB. La superficie de zonas edificadas en ZPB pasó de 0.21 km² en 1987 a 1.28 km² en 2022, principalmente debido al desarrollo de residencias. La ZPAES también experimentó un aumento, con una superficie que pasó de 0.12 km² en 1987 a 0.26 km² en 2022, indicando mayor contaminación antropogénica por la ocupación industrial. En el caso del RVSPV, se observa un crecimiento moderado.

En cuanto al cambio multitemporal de la vegetación, se registró una reducción en ZPB, disminuyendo de 1.60 km² a 1.13 km². Mientras tanto, el RVSPV, a pesar de ser una zona protegida, mostró cambios, con una superficie que pasó de 1.85 km² en 1987 a 1.52 km² en 2022. Aunque el RVSPV es una zona protegida, se evidencian cambios debido a la intervención antropogénica. La ZPAES presentó un cambio moderado, disminuyendo de 0.32 km² a 0.14 km², debido a la industrialización en dicha zona.

Tabla 5: Variación multitemporal de UOA (ZPB, ZPAES) y RVSPV, periodo 1987-2022

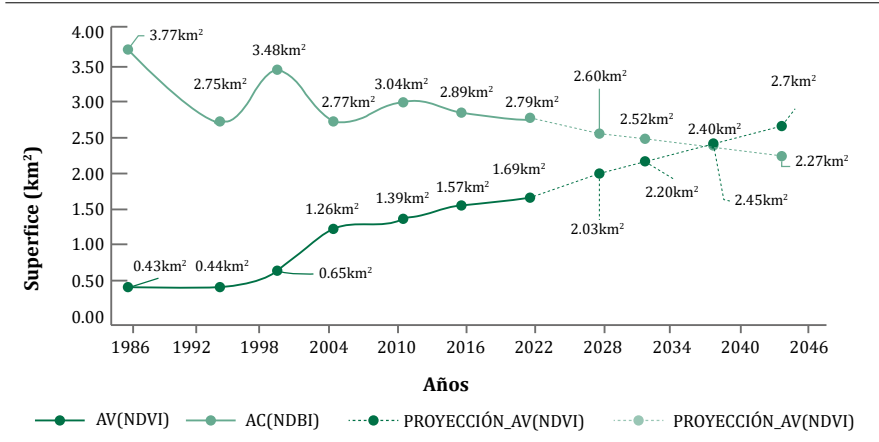
	1987		2022	
	AV(NDVI)*km ²	AC(NDBI)*km ²	AV(NDVI)*km ²	AC(NDBI)*km ²
UOA				
ZPAES	0.32	0.12	0.14	0.26
ZPB	1.60	0.21	1.13	1.28
RVSPV	1.85	0.10	1.52	0.15
TOTAL	3.77	0.43	2.79	1.69

Elaboración propia.

La Figura 3 nos muestra el comportamiento temporal de la superficie en km² de la cobertura vegetal y el crecimiento urbano para el periodo 1987-2022. En un principio, el área de vegetación (3.77 km²) tenía una diferencia marcada con la superficie edificada (0.43 km²). Esta diferencia se fue reduciendo con el paso del tiempo debido al crecimiento de la superficie edificada. El crecimiento urbano o edificado entre los años 1987 y 2000 mostró cambios ligeros, pero a partir del año 2000 se observan cambios más significativos en la pérdida de km² de vegetación densa y el aumento de las superficies edificadas.

Asimismo, cabe recalcar que, si esta tendencia continúa sin una correcta planificación y control, es probable que la superficie de crecimiento urbano supere a la superficie de vegetación para el año 2044, llegando a una superficie edificada de 2.71 km², lo que representará un crecimiento del 527.6% en comparación con la vegetación densa, que mostrará una clara reducción para el año 2044 de 2.27 km², con una tasa de pérdida de -39.7%.

Figura 3. NDVI vs NDBI para las UOA ZPB, ZPAES y el RVSPV, periodo 1987-2022

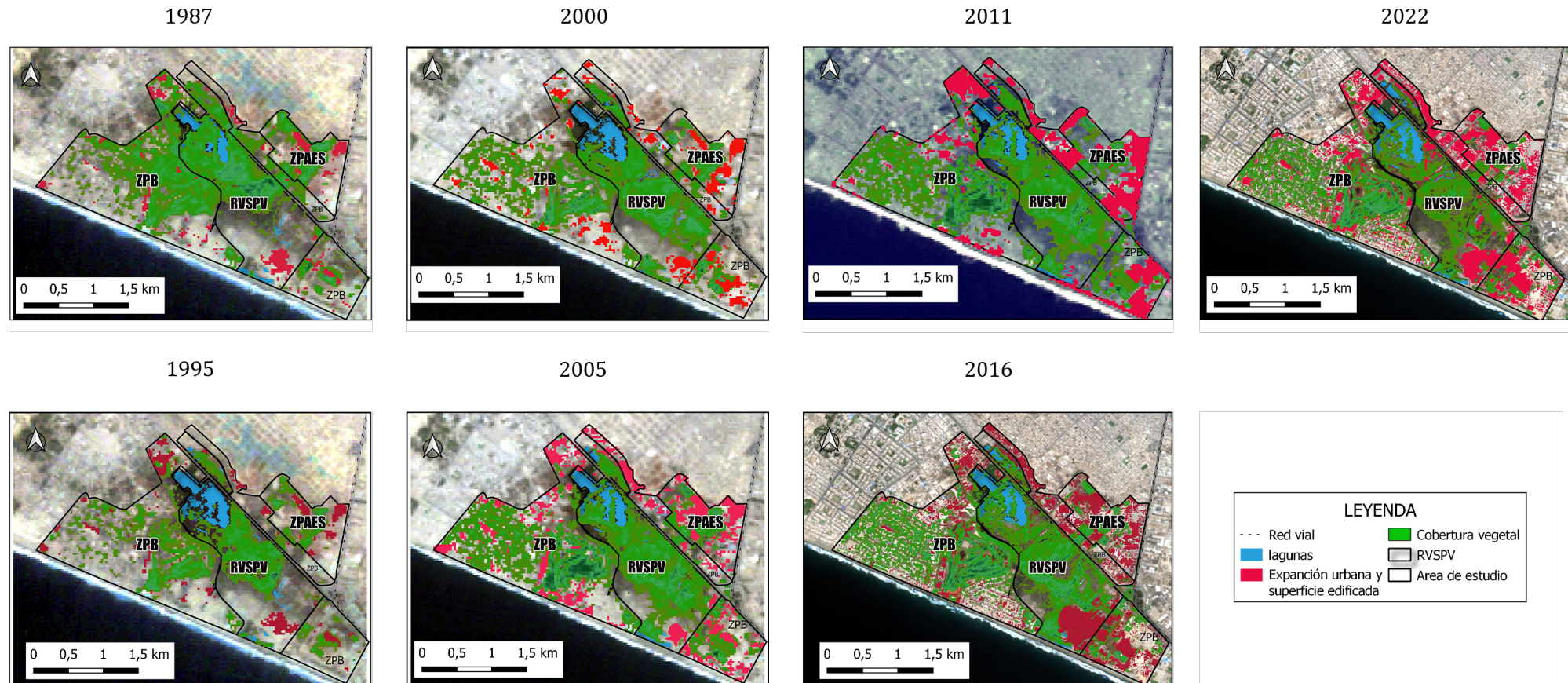


Nota: Elaboración propia. AV: Área de vegetación. AC: Área de crecimiento urbano.

La Figura 4 muestra diferentes periodos comprendidos entre 1987-2022 para la ZPB, ZPAES y el RVSPV. Estos periodos evidencian un predominio en el crecimiento de zonas edificadas. En particular, la ZPAES es la unidad de Ordenamiento Ambiental que ha experimentado los cambios más significativos en pérdidas de superficie de vegetación densa entre 1987 y 2022, seguida de cerca por la ZPB, que, si bien no experimentó cambios tan significativos como la ZPAES, también muestra alteraciones dentro de su límite.

Entre las causas que se pueden atribuir a estos cambios se encuentran, por ejemplo, el cambio de uso de suelo para el sector industrial y el sector inmobiliario, la acumulación de residuos sólidos, la crianza de animales, lo cual explicaría las consecuencias de la pérdida de superficie de vegetación en la ZPB, ZPAES y RVSPV.

Figura 4. Evolución temporal de las UOA (ZPB, ZPAES) y del RVSPV periodos 1987-2022



Nota: Elaboración propia. ZPB: Zona de Protección Paisajística de Borde. ZPAES: Zona de Protección de Afloramiento y Escorrentía Superficial. RVSPV: Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa.

4. **Discusión**

Los humedales ubicados en zonas costeras de Lima son amenazados mayormente por la expansión urbana no planificada, que gana terreno en áreas donde antes había presencia de humedal o cobertura vegetal densa, siendo esta última la más afectada. Esto genera un cambio de uso de suelo, afectando directamente la pérdida de biodiversidad y la fluctuación de la capa freática. La falta de un filtrador natural, como es el caso de la vegetación densa, contribuye al descenso de la capa freática (Pulido & Bermúdez, 2018). Estas problemáticas persisten no solo en el Perú, sino también en los humedales costeros en áreas metropolitanas de Argentina (Iturraspe et al., 2021) y en humedales urbanos de Chile (Rojas, 2022).

Tal es el caso del Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa, donde en los últimos tiempos se ha registrado una disminución en la extensión de estos humedales. Según Urbina et al. (2022), esto se debe principalmente al aumento de las áreas urbanas, lo que implica una mayor necesidad y demanda en el uso del agua, desagüe, así como un incremento en la generación y disposición de residuos de construcciones y basura, entre otros. Estos cambios en el uso del suelo tienen un impacto negativo en la capacidad de retención de agua en estos ecosistemas, según indican Aponte et al. (2020) y Castillo & Huamantínco (2020).

El estudio revela que, en los últimos 35 años, comprendidos entre 1987 y 2022, se ha dado un rápido crecimiento de la superficie urbanizada, que ha aumentado casi tres veces su tamaño inicial (+292%). Este incremento en las zonas urbanizadas ha venido acompañado de una disminución en la cobertura vegetal densa en un -26%. Estas cifras son alarmantes, especialmente considerando que en el periodo comprendido entre 2008 y 2018 se redujo un 17% (Flores et al., 2020). Esta reducción se debe principalmente a la expansión urbana, el acceso libre de caballos, los residuos de construcción (que alteran la composición del suelo y provocan la pérdida de cuerpos de agua y vegetación, así como posibles contaminaciones), el taponamiento de canales y el vertido de aguas sin previo tratamiento (SERNANP, 2016).

Este fenómeno se observa en varios humedales de la costa del Perú, como los humedales de Puerto Viejo y Ventanilla (Moschella, 2012), el humedal relicto de la Chira (Sánchez et al., 2020), el Área de Conservación Regional Albuferas de Medio Mundo, la Poza de la Arenilla, y los humedales Paraíso y Santa Rosa (Aponte et al., 2017).

Finalmente, el uso de herramientas SIG y teledetección son tecnologías indudablemente poderosas para la planificación y la toma de decisiones. En este contexto, los índices urbanísticos, como el NDBI, han demostrado ser herramientas muy eficaces, como lo evidencia el trabajo de Astorga et al. (2020), que utilizaron índices urbanísticos para llevar a cabo un análisis multitemporal del crecimiento urbano en Paraguay. De manera similar, Rosell & Vicente (2015) emplearon índices urbanísticos (NDBI) e índices de vegetación normalizada (NDVI) para determinar el crecimiento demográfico en áreas específicas del municipio de Puan, en la provincia de Buenos Aires (Argentina).

5. Conclusiones

La degradación de la cobertura vegetal y la expansión urbana es un problema constante que va en aumento, especialmente en las zonas adyacentes al RVSLPV. Sin embargo, hasta el momento, no existen investigaciones que aborden la evolución de este espacio a lo largo del tiempo, centrándose en el crecimiento urbano en interacción con áreas naturales mediante el uso de índices espectrales (NDVI y NDBI). Esta investigación demuestra un incremento urbano en su superficie de 1.26 km², con una tasa de crecimiento multitemporal del 292.15% en la superficie urbanizada, y una notable pérdida en la superficie de vegetación densa de 0.98 km² (-23%). Estos resultados sientan las bases para futuras investigaciones y serán útiles para las entidades competentes que necesiten utilizar los datos.

La conservación del RVSPV y sus Unidades de Ordenamiento Ambiental depende fundamentalmente de las medidas de conservación implementadas por las entidades del Estado, como es el caso de PROVHILLA. Esta entidad, mediante la Oficina de Fiscalización y Control, proporciona las garantías necesarias para la preservación del área natural. En este estudio, se evidencia que la pérdida y deterioro de hábitats en los Pantanos de Villa y sus UOA están asociados al manejo inadecuado del recurso hídrico y a las presiones antropogénicas.

Finalmente, esta investigación aporta a los escasos estudios de índices urbanísticos en el Perú, en particular con relación a su uso para monitorear áreas naturales para determinar análisis multitemporales de crecimiento de las superficies urbanas mediante Google Earth Engine. El estudio realizado podrá servir como base para futuras investigaciones relacionadas con esta temática que empleen herramientas SIG y teledetección.

Referencias

- Aponte, H. (2017). *Humedales de la costa central del Perú: Un diagnóstico de los humedales de Santa Rosa, Laguna El Paraíso y Albufera de Medio Mundo*. CooperAcción. https://www.academia.edu/35242909/Humedales_de_la_Costa_central_del_Perú_Un_diagnóstico_de_los_humedales_de_Santa_Rosa_laguna_El_Para%3%ADso_y_Albufera_de_Medio_Mundo
- Aponte, H. (2022). Nuevos reportes en los humedales de la costa central del Perú: comentarios sobre el trabajo de Castillo-Velásquez, et al., 2021. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 287-288. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1568>
- Aponte, H.; Gonzales, S. & Gomez, A. (2020). Impulsores de cambio en los humedales de América Latina: El caso de los humedales costeros de Lima. *South Sustainability*, 1(2). <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-023>.
- Astorga, M., Prieto, F., García-Calabrese, M. V., Sánchez, I., & Delgado, M. (2020). Análisis Espacial Multitemporal de la Expansión Urbana en la Ciudad del Este, Paraguay. Mesa Temática: *Sistemas de Información Geográfica y Análisis Espacial*. III Congreso Internacional de Geografía Urbana. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/339213006>
- Beltrán, D. H. (2017). *Aplicación de Índices de Vegetación para evaluar procesos de restauración ecológica en el Parque Forestal Embalse del Neusa* [Tesis de grado para optar por el título de Especialista en Geomática, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia]. <http://hdl.handle.net/10654/17210>
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293-301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)
- Castillo, R. M. & Huamantínco, A. A. (2020). Variación espacial de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en la zona litoral del humedal costero Santa Rosa, Lima, Perú. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), pp. 50-68. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.35233>
- Flores, N., Castro, I., & Aponte, H. (2020). Evaluación de las unidades de vegetación en Los Pantanos De Villa (Lima, Perú) mediante sistemas de información geográfica y teledetección. *Arnaldoa*, 27(1), 303-321. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27119>
- Gardner, R. C., & Davidson, N. C. (2011). The Ramsar Convention. In B. A. LePage (Ed.), *Wetlands* (pp. 189-203). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0551-7_11
- Gardner, R. C., & Finlayson, M. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales: Estado de los humedales del mundo y sus servicios a las personas. Ramsar, Convención sobre humedales. https://www.ramsar.org/sites/default/files/flipbooks/ramsar_gwo_spanish_web.pdf
- Guillén, G. K. (2002). Diversidad protozoológica de los Pantanos de Villa, Chorrillos-Lima-Perú. [Tesis para optar al título profesional de Biólogo con mención en Zoología, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/817>
- Iturraspe, R. J.; Fank, L.; Urciuolo, A. B. & Lofiego, R. (2021). Efectos del crecimiento urbano sobre humedales costero-continentales del ambiente semiárido de Tierra del Fuego, Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 75, p. 139. <https://doi.org/10.14198/INGEO.17586>

- León Sulca, G. M. (2020). Gobernanza ambiental y conservación: las gestiones del SERNANP y PROHVILLA en el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa. *Revista Argumentos*, 1(1), pp. 119-124. <https://doi.org/10.46476/ra.vi1.20>
- Moschella, P. (2012). Variación y protección de humedales costeros frente a procesos de urbanización: casos Ventanilla y Puerto Viejo [Tesis para optar al título de Magíster en Desarrollo Ambiental, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/4527>
- Mohamed Eid, A. N., Olatubara, C. O., Ewemoje, T. A., Farouk, H., & El-Hennawy, M. T. (2020). Coastal wetland vegetation features and digital Change Detection Mapping based on remotely sensed imagery: El-Burullus Lake, Egypt. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(1), 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.01.004>
- Municipalidad Metropolitana de Lima (2020). Ordenanza 2264. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2556011/ORD%202264%20%2829.07.2020%29%20y%20ANEXOS.pdf.pdf?v=1638393451>
- Pulido, V., & Bermúdez, L. (2018). Estado actual de la conservación de los hábitats de los Pantanos de Villa, Lima, Perú. *Arnaldoa*, 25(2). <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.252.25219>
- Ramsar. (2021). Perspectiva mundial sobre los humedales: Edición especial de 2021. Secretaría de la Convención sobre los Humedales: Gland, Suiza. https://static1.squarespace.com/static/5b256c78e17ba335ea89fe1f/t/61b8a951c302f4685dd2944d/1639491927838/Ramsar+GWO_Special+Edition+2021%E2%80%93SPANISH_WEB.pdf
- Rojas, C. (2022). Evidencias del impacto de la urbanización en el sistema de humedales del Área Metropolitana de Concepción (Chile). *Región Metropolitana de Barcelona: Papers*, (64), 190-198. <https://raco.cat/index.php/PapersIERMB/article/view/402579>
- Rosell, P. A., & Vicente, M. N. (2016). Análisis del crecimiento demográfico y la relación entre espacios verdes y edificados en Darregueira con QGIS. *Conferencia de Geomática Libre*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/300018730_Analisis_del_crecimiento_demografico_y_la_relacion_entre_espacios_verdes_y_edificados_en_Darregueira_con_QGIS
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas [SERNANP] (2016). Plan maestro del Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa 2016-2020. https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/28593755/documents/PE884_mgt230516.EDIT.pdf
- Solórzano, J. V. & Perilla, G. A. (2022). *Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento*. Repositorio Institucional de Documentación Científica. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/36058>
- Urbina, D.; Rivera Cáceda, F. & Aponte, H. (2022). ¿Se están reduciendo los humedales de la costa del Pacífico suramericano? El caso de los humedales de Lima. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(181), pp. 985-998. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1699>