



Estimación de resiliencia ecológica en la laguna Las Peonías (Venezuela) mediante análisis integrado GIS-LiDAR

Estimation of ecological resilience in Las Peonías lagoon (Venezuela) by integrated analysis GIS-LiDAR

Julio Marín^{1*}, Oswaldo Moreno¹, Eglimar Bastidas¹, Angel Corona² y Andreina Fernández³

0000-0003-2770-5978

0000-0001-5147-7691

0000-0001-9792-1188

0000-0003-2830-4252

0000-0002-4677-0698

1. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. jmarin@fing.luz.edu.ve*, waldom1593@gmail.com, eglimarbastidas@gmail.com

2. Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. ancorona@gmail.com

3. Área de Industria, Vicerrectoría Académica, Centro de Formación Técnica CENCO, Enrique Mac Iver 125, Santiago, Chile. andreinafernandez@gmail.com

* Autor de correspondencia / Corresponding author

RESUMEN

La resiliencia ecológica refleja la capacidad de un ecosistema para mantener sus condiciones funcionales y estructurales ante la acción de perturbaciones externas, cuyos límites son dependientes de las características específicas y de la velocidad de recuperación. En este trabajo se estimó la resiliencia ecológica de la laguna Las Peonías (Zulia, Venezuela) entre 2011 y 2019, mediante el análisis integrado GIS-LiDAR (por su siglas en inglés, *Geographic Information System – Light Detection and Ranging*), con la finalidad de conocer su capacidad para absorber los impactos de las actividades antrópicas y orientar la gestión ambiental futura en este cuerpo de agua. Para ello, se determinaron las zonas de actividad antrópica y se calcularon los indicadores de transformación del terreno, de impactos antrópicos y los derivados de la transformación. Los resultados exhibieron un índice de resiliencia ecológica entre $< 0,01$ (2013) y $0,08$ (2011), mientras que la regeneración costera se ubicó entre $0,46$ (2013) y $75,37$ (2011); indicando que la laguna se encuentra en un constante proceso regenerativo, con una capacidad muy pequeña de soportar impactos antrópicos continuos sin sufrir perturbaciones en su equilibrio, lo cual se traduce en un estado de riesgo ambiental elevado debido al desarrollo de un proceso de eutrofización activo y en nivel avanzado.

PALABRAS CLAVE: impacto antrópico, Lago de Maracaibo, laguna costera tropical, regeneración ecológica, transformación del terreno.

ABSTRACT

Ecological resilience reveals the ability of ecosystems to conserve their structural and dynamic characteristics in the face of external instabilities, so their limits are dependent on the specific conditions and the regaining velocity. In the present work, the ecological resilience of the Las Peonías lagoon (Zulia, Venezuela) was estimated between 2011 and 2019, through an integrated analysis GIS-LiDAR (Geographic Information System – Light Detection and Ranging), with the aim of determining its capacity to absorb the impacts of anthropic activities and guide future environmental management in this water body. Thus, the anthropic activity zones and the indicators of land transformation, anthropic impacts, and those derived from the transformation were estimated. The results showed an ecological resilience index between < 0.01 (2013) and 0.08 (2011) and a coastal regeneration degree between 0.46 (2013) and 75.37 (2011); indicating that the lagoon is in a constant regenerative process, with a very small capacity to counteract continuous anthropic impacts without suffering disturbances in its ecosystem balance. This refers to a condition of high environmental risk due to the development of an active and advanced eutrophication process.

KEYWORDS: anthropic impact, ecological regeneration, Maracaibo Lake, territorial transformation, tropical coastal lagoon.

INTRODUCCIÓN

La gestión ambiental aplicada al caso de las lagunas costeras permite utilizar diferentes mecanismos técnicos y tecnológicos, tanto para diagnosticar y analizar las necesidades actuales y futuras, como para diseñar e implementar medidas de acción que permitan la convivencia entre las actividades antrópicas existentes (p. ej. turismo, agricultura, pesca, recreación, industria, entre otras) y la preservación de los valores naturales de estos territorios (García-Ayllón, 2017). Está bien documentado que estos cuerpos de agua están frecuentemente sometidos a diversos problemas ambientales, como producto de su interacción con dichas actividades humanas, originando procesos de perturbación, fragmentación y degradación de hábitats que potencialmente afectan la biodiversidad y la estabilidad del ecosistema (Kennish, 2015; Pelletier *et al.*, 2020; De Wit *et al.*, 2021; Scapin *et al.*, 2022). Adicionalmente, el grado de afectación del territorio circundante en estos ambientes costeros también repercute sobre la estabilidad ecosistémica, producto de la intervención humana en estas zonas protectoras, mediante: desviaciones de ríos, construcción de presas, deforestación de cuencas, obras de control de erosión y sedimentación marina, desarrollo de viviendas y edificaciones recreacionales, construcción de carreteras, cierre de las bocas, destrucción del manglar, instalaciones de salinas y camarónicas, dragado de canales, rellenos para expansión urbana e industrial, depósitos de basura, cambio climático, entre otros (Anthony *et al.*, 2009; Ansari *et al.*, 2011; Glibert *et al.*, 2014; Friedland *et al.*, 2019; Lenzi y Cianchi, 2022).

El problema de contaminación de los ecosistemas lénticos depende de la habilidad de asimilación de los contaminantes, la cual está controlada por su capacidad de autopurificación, dada por sus mecanismos naturales de defensa (Semenov *et al.*, 2019). Esta habilidad y capacidad para absorber, amortiguar y resistir los cambios abióticos y bióticos que ocurren después de las perturbaciones de origen natural o antrópico, se define como resiliencia ecológica; un indicador que permite identificar, monitorear y desarrollar estrategias de manejo y conservación (Holling, 1973; Ludwig *et al.*, 1996; Gunderson, 2000, 2010; Bellwood *et al.*, 2004; Baho *et al.*, 2017; García-Ayllón, 2017). Dicha capacidad de recuperación o amortiguamiento es determinada por variables específicas asociadas con la regeneración, como la composición de plantas, productividad biológica, biomasa, acumulación de nutrientes y diversidad ecológica (Pimm, 1999).

INTRODUCTION

Environmental management applied to the case of coastal lagoons enables the use of different technical and technological mechanisms both to diagnose and analyze current and future needs and to design and implement action steps allowing for the coexistence of anthropic activities (*e.g.*, tourism, agriculture, fishing, recreation, industry, among other) and the preservation of these territories' natural values (García-Ayllón, 2017). It has been well documented that these bodies of water are frequently subjected to diverse environmental issues, as a product of their interaction with said human activity. This entails habitat perturbation, fragmentation, and degradation processes with a potential to affect ecosystem biodiversity and stability (Kennish, 2015; Pelletier *et al.*, 2020; De Wit *et al.*, 2021; Scapin *et al.*, 2022). The degree of affectation in the territory surrounding these coastal environments also has an impact on ecosystem stability as a result of human intervention in these protective areas. This happens through river deviations, the dam construction, basin construction, erosion and marine sedimentation control works, the development of housing and recreational buildings, road construction, mouth closure, mangrove destruction, the installation of salt extraction and shrimp fishing operations, channel dredging, landfills for urban and industrial expansion, waste deposits, climate change, among others (Anthony *et al.*, 2009; Ansari *et al.*, 2011; Glibert *et al.*, 2014; Friedland *et al.*, 2019; Lenzi and Cianchi, 2022).

The issue of pollution in lentic ecosystems depends on pollutant assimilation capabilities, which are dictated by lakes' self-purification capacity according to their natural defense mechanisms (Semenov *et al.*, 2019). This ability to absorb, dampen, and resist the biotic and abiotic changes that occur after natural or anthropogenic perturbations is defined as ecological resilience, an indicator that allows identifying, monitoring, and developing management and conservation strategies (Holling, 1973; Ludwig *et al.*, 1996; Gunderson, 2000, 2010; Bellwood *et al.*, 2004; Baho *et al.*, 2017; García-Ayllón, 2017). These recovery or dampening capabilities are determined by specific variables associated with regeneration, such as plant composition, biological productivity, biomass, nutrient accumulation, and ecological diversity (Pimm, 1999).

To estimate ecological resilience in natural environments, different approaches have been employed, including *i*) the study and understanding of the mechanisms

Para estimar la resiliencia ecológica en ambientes naturales se han aplicado diferentes enfoques, entre los que se cuentan: *i*) estudio y comprensión de los mecanismos a través de los cuales se desarrolla la robustez, entendiéndose por robustez la persistencia de características sistémicas para las que no existen herramientas matemáticas donde se apliquen la teoría de la estabilidad (Jen, 2003); *ii*) aplicación de los conceptos de resiliencia ecológica, ciclos adaptativos y panarquías para comparar sistemas comunitarios, ecológicos y humanos (Gunderson, 2010); *iii*) cuantificación y descripción de servicios ecosistémicos, incluidos los cambios en los riesgos de floración de algas nocivas, para lo cual se proponen dos indicadores integradores de resiliencia: extensión de la vegetación acuática sumergida y distribución espacial de los peces (Wainger *et al.*, 2017); *iv*); enfoque cuantitativo para medir y evaluar la resiliencia, con el propósito de cerrar las brechas entre la ciencia, política y gestión, considerando los atributos complementarios (escalas, capacidad de adaptación, umbrales y regímenes alternativos) que abarcan la complejidad inherente a los ecosistemas (Baho *et al.*, 2017); y *v*) enfoque multidisciplinario mediante un análisis integrado GIS-LiDAR (por su siglas en inglés, Geographic Information System – Light Detection and Ranging), planteando una evaluación integral de la situación y de los desafíos que enfrentan estos ambientes, ayudando a resolver sus problemas actuales (García-Ayllón, 2017). Esta última visión surge como una herramienta innovadora que permite generar resultados objetivos mediante el análisis cuantitativo de los impactos, efectos y amenazas de las actividades humanas sobre los ecosistemas acuáticos, aplicando una metodología sencilla y relativamente precisa.

El objetivo de este trabajo consistió en estimar la resiliencia ecológica de la laguna Las Peonías (Zulia, Venezuela) entre 2011 y 2019, mediante el análisis integrado GIS-LiDAR. Para ello, se determinaron las dimensiones de las áreas de actividad antrópica y se calcularon los indicadores de transformación del terreno y de impactos antrópicos (ocupación costera, afectación agrícola, incidencia mixta y transformación anual media del terreno), y los derivados de la transformación (fragmentación de impacto, regeneración costera y resiliencia ecológica), a fin de conocer el grado de estabilidad ecosistémica y aportar herramientas técnicas para su recuperación ambiental y gestión integral del recurso agua. La adopción de esta metodología con indicadores que permiten realizar diagnósticos globales, susceptibles de ser comparados de una laguna a otra en diferentes partes del mundo, permite resaltar la capacidad de estos ecosistemas

through which robustness is developed (this concept is understood as the persistence of systemic characteristics for which there are no mathematical tools where stability theory is applied) (Jen, 2003); *ii*) the application of the concepts of ecological resilience, adaptive cycles, and panarchy in comparing community, ecological, and human systems (Gunderson, 2010); *iii*) the quantification and description of ecosystem services, including changes in the risks of harmful algae blooms, for which two integrating resilience indicators are proposed: the extension of submerged aquatic vegetation and the spatial distribution of fish (Wainger *et al.*, 2017); *iv*) a qualitative approach to measure and evaluate resilience, with the purpose of closing the gaps between science, policies, and management while considering complementary attributes (scales, adaptation capabilities, thresholds, and alternative regimes) encompassing ecosystems' inherent complexity (Baho *et al.*, 2017); and *v*) a multidisciplinary approach using integrated GIS-LiDAR analysis (Geographic Information Systems-Light Detection and Ranging), which proposes a comprehensive evaluation of the situations and challenges faced by these environments and helps to resolve their current issues (García-Ayllón, 2017). The latter appears as an innovative tool that allows generating objective results via a quantitative analysis of the impacts, effects, and threats caused by human activities on aquatic ecosystems, applying a simple and relatively precise methodology.

The objective of this work was to estimate the ecological resilience of Las Peonías lagoon (Zulia, Venezuela) between 2011 and 2019, by means of integrated GIS-LiDAR analysis. To this effect, the dimensions of the anthropic activity areas were determined, and terrain transformation and anthropic impact indicators were calculated (coastal occupation, agricultural affectation, mixed incidence, and average annual terrain transformation), as well as those derived from transformation (impact fragmentation, coastal regeneration, and ecological resilience). This, in order to understand the degree of ecosystem stability and contribute with technical tools for environmental recovery and the integral management of water resources. The adoption of this methodology, together with indicators allowing to carry out global diagnostics comparable to those of other lagoons in other parts of the world, allows highlighting these ecosystems' ability to absorb the impacts of the activities surrounding them, as well as steering their future management (García-Ayllón, 2017).

para absorber los impactos de las actividades que los rodean y orientar hacia dónde debe encaminarse su gestión futura (García-Ayllón, 2017).

ÁREA DE ESTUDIO

La laguna Las Peonías está ubicada geográficamente entre las coordenadas huso 19 N proyección UTM 1 191 049,27 – 210 319,57 N y 1 189 178,13 – 193 657,96 O, en el sector noroccidente del Estrecho de Maracaibo, entre los municipios Maracaibo y Mara del estado Zulia (Venezuela), formando parte de la cuenca hidrográfica del sistema Lago de Maracaibo (Figura 1). Es un cuerpo de agua eutrófico somero (60-67 cm aproximadamente), situado en tierra firme y separado parcialmente de la bahía El Tablazo por una barrera litoral, ofreciendo canales estrechos como el caño Araguato (aprox. 1 km de longitud; 4,0 m de ancho y 2,5 m de profundidad), que permiten su comunicación con el lago de acuerdo con los ciclos de marea y manteniendo un régimen fluctuante de salinidad y una alta productividad fitoplanctónica (Acevedo y Cañas, 1980; Iclam, 1988, 2000, 2005; Mora, 2009).

Tiene un área superficial de aprox. 6,3 km², longitud máxima de 5 900 m y anchura máxima de 2 200 m; cuyo relieve es principalmente plano con altitudes que varían entre 0 y 2 msnm (metros sobre el nivel del mar), y un vaso hidráulico de aprox. 4,15 × 10⁶ m³ de volumen (Iclam, 1988, 2000, 2005; González *et al.*, 2007). La forma de la laguna es irregular, observándose la formación de tierras intermedias (islotos) con pasajes naturales, donde la vegetación forma estrechos corredores y espacios abiertos con grandes proporciones de agua. La vegetación de manglares del perímetro de la laguna define su contorno, sirviendo además como hábitat para una gran variedad de flora y fauna (Iclam, 1988, 2004, 2005).

Durante las últimas décadas esta laguna ha experimentado el deterioro de su calidad ambiental como resultado de la influencia antrópica en su espejo de agua y área circundante (Iclam, 1988, 2000, 2005; González *et al.*, 2007; Minec, 2018; Marín-Leal *et al.*, 2019), principalmente debido a: urbanización e industrialización, deforestación y modificación del terreno, vertido de aguas residuales no tratadas, criaderos porcinos, producción de sal, entre otros. Esto ha producido una disminución notable en el intercambio de aguas con el Lago de Maracaibo, generando el estancamiento y empobrecimiento de las mismas, con el subsecuente impacto sobre la biota autóctona. Además del agua drenada por la cuenca tributaria que rodea la laguna,

STUDY AREA

Las Peonías lagoon is geographically located between the 19N zone, UTM projection coordinates 1,191,049.27 – 210,319.57 N and 1,189,178.13 – 193,657.96 W, in the northwestern sector of the Maracaibo Strait, between the municipalities of Maracaibo and Mara in the state of Zulia (Venezuela). This lagoon is part of the Lake Maracaibo hydrographic basin (Figure 1). It is a mainland, shallow eutrophic body of water (approximately 60-67 cm) partially separated from El Tablazo bay by a littoral barrier, offering narrow channels such as the Araguato channel (approx. 1 km long, 4.0 m wide, and 2.5 m deep), which allow it to communicate with the lake according to tidal cycles while maintaining a fluctuating salinity regime and a high phytoplankton productivity (Acevedo and Cañas, 1980; Iclam, 1988, 2000, 2005; Mora, 2009).

It has a surface area of approximately 6.3 km², a maximum length of 5,900 m, and a maximum width of 2,200 m. Its relief is mainly flat, with altitudes varying between 0 and 2 masl (meters above sea level), and it has a hydraulic vessel volume of about (Iclam, 1988, 2000, 2005; González *et al.*, 2007). The shape of the lagoon is irregular; the formation of intermediate lands (islets) with natural landscapes where the vegetation creates narrow passages and open spaces with great proportions of water. The perimeter of the lagoon is defined by mangrove vegetation, which also serves as a habitat for a wide variety of flora and fauna (Iclam, 1988, 2004, 2005).

In recent decades this lagoon has experienced a decline in its environmental quality as a result from anthropic influence in its water mirror and surrounding area (Iclam, 1988, 2000, 2005; González *et al.*, 2007; Minec, 2018; Marín-Leal *et al.*, 2019), mainly due to urbanization and industrialization, terrain deforestation and modification, nontreated wastewater dumping, pig farms, and salt production, among others. This has caused a noticeable decrease in the water exchange with Maracaibo lake, which entails stagnation and pauperization, with a subsequent impact on native biota. In addition to the water drained along the tributary watershed surrounding it, the lagoon receives contributions from the Iragorri and Fénix glen from the west and northwest, respectively. These glen drain a large portion of Maracaibo's northern zone and lead a significant wastewater flow to the lagoon (1,100 l/sec). In addition, pluvial drainage causes higher-flow peaks and a faster response to precipitation (Iclam, 2005; González *et al.*, 2012; Corona, 2016; Minec, 2018).

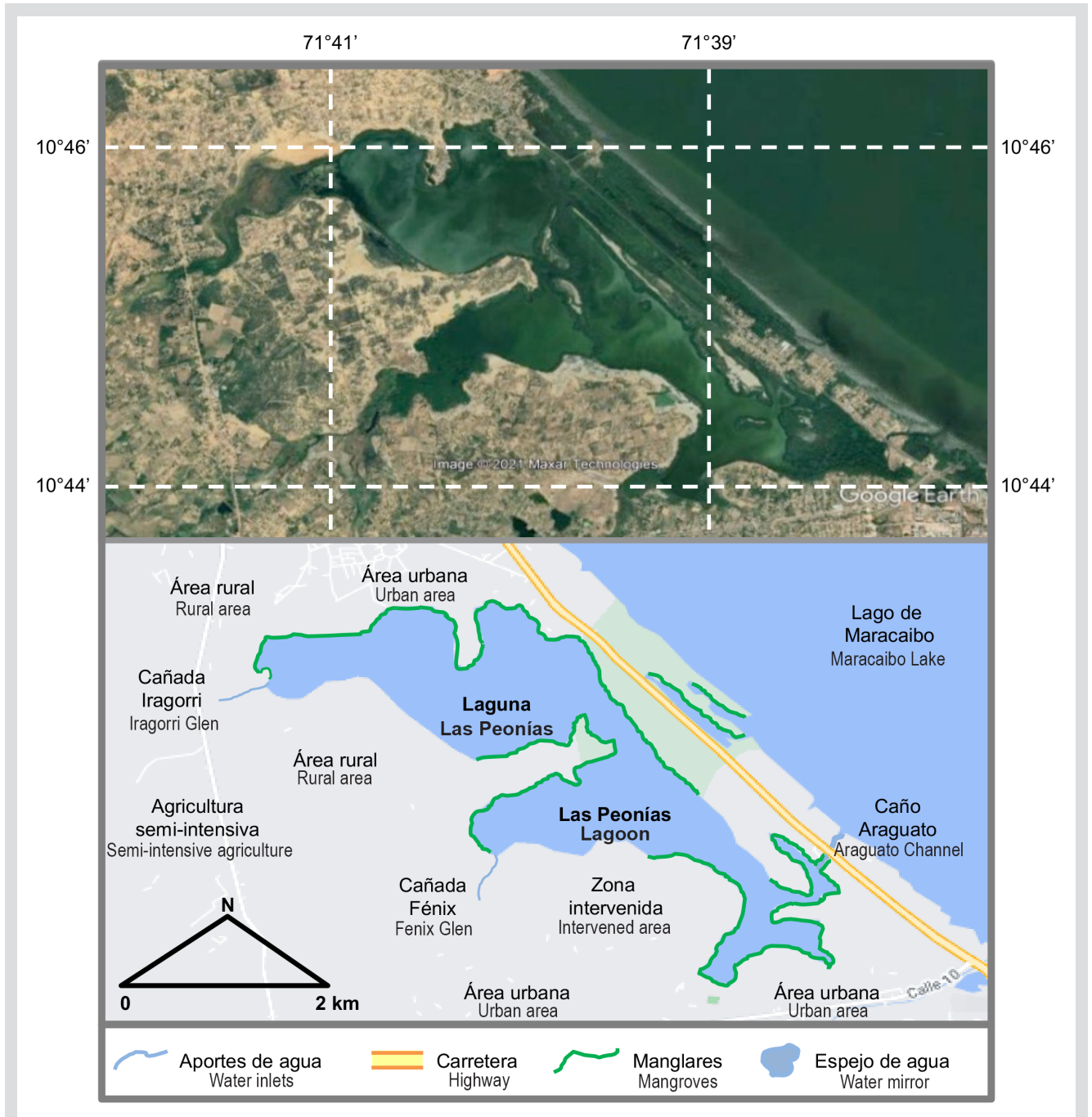


Figura 1. Área de estudio. Ubicación geográfica de la laguna Las Peonías (Zulia, Venezuela) y características del área circundante (modificado de Google Earth).

Figure 1. Study area. Geographical location of Las Peonías lagoon (Zulia, Venezuela) and characteristics of the surrounding area (modified from Google Earth).

esta recibe por el occidente y noroccidente los aportes de las cañadas Iragorri y Fénix (Figura 1), respectivamente, que drenan buena parte del sector norte de Maracaibo y conducen a la laguna un importante caudal de aguas residuales (1 100 l/seg), aparte del drenaje pluvial que produce picos de mayor caudal y más rápida respuesta a la precipitación (Iclan, 2005; González *et al.*, 2012; Corona, 2016; Minec, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

Delimitación de zonas de actividad antrópica

Para la delimitación de las áreas de actividad antrópica en la laguna (área urbanizada, zonas perimetrales y área agrícola), se utilizó el análisis de imágenes satelitales Landsat TM 7 entre 2011 y 2019 (resolución 1 pixel = 30 × 30 m), las cuales fueron inspeccionadas visualmente y clasificadas de forma no supervisada (ITC, 0000). Las fechas de estas imágenes fueron: 25-oct-2011, 27-oct-2012, 30-oct-2013, 17-oct-2014, 20-oct-2015, 22-oct-2016, 25-oct-2017, 28-oct-2018 y 25-oct-2019 (USGS, 2020). Haciendo uso del mapa de vegetación actualizado, se calculó la extensión original y actual de las zonas de actividad antrópica (Landsat-7, 2019a, 2019b). La digitalización, georreferenciación y análisis de las imágenes se realizó con el programa ArcGIS 10.5 (Esri, 2012; 2019), obteniéndose la información detallada de las áreas urbanizadas, zonas perimetrales y áreas agrícolas, para la estimación de los indicadores que se describen a continuación.

Indicadores de transformación del terreno y de impactos antrópicos

La estimación de indicadores de transformación del terreno y de los asociados a impactos antrópicos a través de criterios básicos comunes permite realizar comparaciones entre diferentes casos de estudio, en cuanto a cuerpos de agua costeros se refiere. Este grupo de indicadores proporciona información clara sobre la naturaleza real del contexto al que está sometido el cuerpo de agua.

Índice de ocupación costera

Este índice representa el factor de carga de los primeros 500 m de la costa para el área de referencia. Así, la superficie costera del territorio conformada por áreas aún no urbanizadas, con relación a la superficie costera total en el perímetro de la laguna, se estimó mediante la siguiente ecuación (García-Ayllón, 2017):

$$IOC = \frac{U_A}{S_A} \quad (1)$$

Donde: IOC, índice de ocupación costera (porcentaje de terreno ocupado por superficies artificiales en los primeros 500 m de la costa); U_A , área urbanizada (km² ocupados por áreas artificiales) y S_A , área de referencia de 500 m en la costa (divisiones en km² dentro de la zona de amortiguación de 500 m consideradas en paralelo a la orilla de la laguna).

MATERIALS AND METHODS

Delimitation of anthropic activity zones

In order to delimit the areas of anthropic activity in the lagoon (urbanized area, perimeter zones, and agricultural area), 2011-2019 Landsat TM 7 images were used (resolution 1 pixel = 30 × 30 m), which were visually inspected and classified in an unsupervised fashion (ITC, 0000). The dates of these images are 25-Oct-2011, 27-Oct-2012, 30-Oct-2013, 17-Oct-2014, 20-Oct-2015, 22-Oct-2016, 25-Oct-2017, 28-Oct-2018, and 25-Oct-2019 (USGS, 2020). Using the updated vegetation map, the original and current extension of the anthropic activity zones was calculated (Landsat-7, 2019a, 2019b). Image digitization, geo-referencing, and analysis were performed via the ArcGIS 10.5 software (Esri, 2012; 2019), thus obtaining detailed information on the urbanized, perimeter, and agricultural areas in order to estimate the indicators described below.

Indicators of terrain transformation and anthropic impacts

Estimating terrain transformation indices and those associated with anthropic impacts using common basic criteria allows comparing different study cases regarding coastal bodies of water. This group of indicators provides clear information about the actual nature of a body of water's context.

Coastal occupation index

This index represents the load factor of the first 500 m of the coast for the reference area. Thus, the coastal surface of the territory comprising areas that have not yet been urbanized was estimated in relation to the total coastal surface in the lagoon's perimeter via the following equation (García-Ayllón, 2017):

$$IOC = \frac{U_A}{S_A} \quad (1)$$

Where: IOC: coastal occupation index (percentage of the terrain occupied by artificial surfaces in the first 500 m of the coast; U_A ; urbanized area (km² occupied by artificial areas); S_A : 500 m reference area in the coast (divisions and km² within the 500 m dampening zone considered as parallel to the lagoon's shore).

Índice de afectación agrícola

Este índice representa el área agrícola cultivada cuyas contribuciones superficiales y subterráneas mantienen algún tipo de vínculo físico con la laguna, definida de manera homogénea para admitir comparaciones posteriores. Esta relación adimensional entre la presencia de actividades agrícolas y la superficie de la laguna, se calculó aplicando la siguiente ecuación (García-Ayllón, 2017):

$$IAA = \frac{S_A}{S_L} \quad (2)$$

Donde: IAA, índice de afectación agrícola (porcentaje de tierras agrícolas vinculadas a la laguna); S_A , terreno transformado para la agricultura con algún tipo de vínculo con la laguna y S_L , área superficial de la laguna.

Índice de incidencia mixta

Es la relación adimensional entre la presencia de diferentes actividades humanas y la superficie de la laguna, indicando la contribución de dichas actividades a la transformación del terreno, sin incluir la agricultura. La contribución de cada una de estas actividades en la laguna, se determinó utilizando sus áreas superficiales y los factores de corrección específicos, de acuerdo con la siguiente ecuación (García-Ayllón, 2017):

$$IIM = \sum \frac{(S_i \times C_i)}{S_L} \quad (3)$$

Donde: IIM, índice de incidencia mixta; S_i , actividad i medida; C_i , factor de corrección para la actividad i y S_L , área superficial de la laguna. Para la definición de los factores de corrección, C_i , se consideran actividades que tengan un vínculo directo o indirecto con el entorno; por ello, se identificaron las variables de calidad de agua: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), como indicadoras de las principales actividades de impacto en la zona (aguas residuales provenientes de las zonas urbanas e industriales) y que afectan directamente a la laguna a través de las cañadas Irigorri y Fénix y caño Araguato (Tabla 1), de acuerdo con estudios previos (Iclam, 1988, 2000, 2005; Mora, 2009; González *et al.*, 2012; Corona, 2016; Fernández, 2017; Marín-Leal *et al.*, 2019). De esta manera, los valores de C_i se calcularon según Monsalve (2008) y Beltrán y Rangel (2013):

$$C_i = \frac{C_o}{C_{max}} \quad (4)$$

Agricultural affectation index

This index represents the harvested agricultural area whose surface and below-ground contributions maintain some type of physical link to the lagoon. It is homogeneously defined to support later comparisons. This dimensionless relation between agricultural activity and the lagoon's surface was calculated by applying the following equation (García-Ayllón, 2017):

$$IAA = \frac{S_A}{S_L} \quad (2)$$

Where: IAA: agricultural affectation index (percentage of agricultural land linked to the lagoon); S_A : terrain transformed for agriculture with some type of link to the lagoon; S_L : surface area of the lagoon.

Mixed incidence index

It is the dimensionless relation between the presence of different human activities and the surface of the lagoon, and it indicates the contribution of said activities to terrain transformation, without including agriculture. The contribution of each activity was determined by using the surface area and specific correction factors according to the following equation (García-Ayllón, 2017):

$$IIM = \sum \frac{(S_i \times C_i)}{S_L} \quad (3)$$

Where: IIM; mixed incidence index; S_i ; measured activity i ; C_i ; correction factor for activity i ; S_L : lagoon surface area. To define the correction factors (C_i), activities are considered which are directly or indirectly linked to the environment. Therefore, variables related to water quality were identified, *i.e.*, biochemical oxygen demand (DBO), chemical oxygen demand (DQO), total nitrogen (NT), and total phosphorus (PT), as indicators of the main activities with an impact in the area (residual waters from urban and industrial areas) which directly affect the lagoon by means of the Irigorri and Fénix glen and the Araguato channel (Table 1) according to previous studies (Iclam, 1988, 2000, 2005; Mora, 2009; González *et al.*, 2012; Corona, 2016; Fernández, 2017; Marín-Leal *et al.*, 2019). Thus, C_i values were calculated as per Monsalve (2008) and Beltrán and Rangel (2013):

$$C_i = \frac{C_o}{C_{max}} \quad (4)$$

Donde: Co, concentración de la variable (DBO, DQO, NT o PT) en el sitio específico y C_{máx}, concentración máxima de la variable que excede el límite permisible de la norma ambiental (Decreto 883, 1995).

Tabla 1. Concentraciones (Co, media aritmética ± desviación estándar) de los indicadores de contaminación identificados: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) (González *et al.*, 2012; Fernández, 2017; Marín-Leal *et al.*, 2019), y factores de corrección calculados (Ci) en las zonas de alto impacto antrópico en la laguna Las Peonías.

Zona / Area	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	NT (mg/l)	PT (mg/l)
	Co			
Cañada Irigorri / Irigorri Glen	9.9 ± 5.8	377.2 ± 491.0	11.5 ± 3.8	3.4 ± 2.3
Cañada Fénix / Fenix Glen	6.3 ± 3.4	2.7 ± 280.3	5.5 ± 1.6	3.0 ± 1.8
Caño Araguato / Araguato Channel	8.9 ± 5.3	238.5 ± 121.9	2.5 ± 3.4	2.3 ± 0.8
Zona / Area	Ci			
Cañada Irigorri / Irigorri Glen	0.028	6.283	0.288	0.340
Cañada Fénix / Fenix Glen	0.018	0.046	0.140	0.300
Caño Araguato / Araguato Channel	0.025	3.966	0.062	0.230

Where: Co; concentration of the DBO, DQO, NT, or PT variable at the specific site; C_{máx}: maximum concentration of the variable which exceeds the permissible limit as per environmental regulations (Decree 883, 1995).

Table 1. Concentrations (Co, arithmetic mean±standard deviation) of the identified pollution indicators: biochemical oxygen demand (DBO), chemical oxygen demand (DQO), total nitrogen (NT), and total phosphorus (PT) (González *et al.*, 2012; Fernández, 2017; Marín-Leal *et al.*, 2019). Calculated correction factors (Ci) in areas of high anthropic impact in Las Peonías lagoon.

Indicador de transformación anual media del terreno

La tasa de crecimiento anual de transformación del terreno permite introducir la variable del tiempo en el análisis de la resiliencia ecológica, con el fin de evaluar la velocidad de transformación. Este indicador es de particular interés debido a que permite definir la relación entre la velocidad de consumo del terreno para actividades humanas y sus derivados en el área de referencia. Se expresa como el porcentaje de territorio consumido durante un período de tiempo específico, según (García-Ayllón, 2017):

$$Ti = 100 \times \sum \frac{(C_2 \times C_1)}{(a \times C_1)} \quad (5)$$

Donde: Ti, tasa media de crecimiento; C_i, área de terreno consumido (hectáreas) en la fecha i (representado como C₁ y C₂) y a, factor de corrección (en el caso de territorios transformados homogéneamente es igual a 1).

Indicadores derivados de la transformación

Estos indicadores permiten identificar de manera precisa el nivel de impacto de las actividades antrópicas sobre la laguna y su capacidad para asumirlas, mediante un diagnóstico integral.

Average annual terrain transformation indicator

The annual growth rate of the terrain allows introducing the time variable in analyzing ecological resilience, with the purpose of evaluating the transformation speed. This indicator is of particular interest since it allows defining the relationship between the terrain's consumption rate for human activities and their derivatives in the reference area. It is expressed as the percentage of consumed territory over a specific period of time, according to García-Ayllón (2017):

$$Ti = 100 \times \sum \frac{(C_2 \times C_1)}{(a \times C_1)} \quad (5)$$

Where: Ti: average growth rate; C_i: consumed terrain area (ha) on date i (represented as C₁ and C₂): a: correction factor (in the case of territories that have been homogeneously transformed, it is equal to 1).

Indicators derived from transformation

These indicators allow for a more accurate identification of the impact of anthropic activities on the lagoon, as well as of its ability to deal with them, by means of integral diagnostics.

Indicador de fragmentación de impacto

Permite conocer cómo los cambios antrópicos afectan el área circundante de la laguna. Es un índice adimensional que relaciona la fragmentación de los impactos antrópicos en los perímetros, con la superficie de la laguna. Un valor elevado indica un mayor grado de dispersión o fragmentación de impactos. Se calculó aplicando la siguiente ecuación (García-Ayllón, 2017):

$$IFI = \sum_i \frac{L_i}{S_{Ai}} \times \sqrt{S_L} \quad (6)$$

Donde: IFI, indicador de fragmentación de impacto; L_i , límite de la laguna afectado por la actividad antrópica en la franja costera i (m); S_{Ai} , área de actividad antrópica vinculada a la laguna a través de la franja costera i (m^2) y S_L , área superficial de la laguna (m^2). Se estableció el área a 1 000 m de la costa como la de afectación por la actividad antrópica.

Índice de regeneración costera

Este índice relaciona las posibles causas exógenas de impacto con la capacidad de regeneración natural de la laguna. Se expresa mediante la relación del número y la capacidad de los elementos de desequilibrio de entrada con los elementos de recuperación de las condiciones naturales del sistema, teniendo en cuenta los impactos del clima. Cuanto menor es el índice, más insostenible será la tendencia, según la siguiente ecuación (García-Ayllón, 2017):

$$IRC = \sum_i \left[\frac{n_{1i}}{n_{2i}} \times \frac{C_{1i}}{C_{2i}} \right] \quad (7)$$

Donde: IRC, índice de regeneración costera; n_{1i} , número de conexiones al mar abierto o canales de restauración; n_{2i} , número de efluentes o elementos que generan impactos antrópicos; C_{1i} , capacidad física de las conexiones al mar abierto o canales de restauración y aportes climáticos; y C_{2i} , capacidad de los efluentes y variaciones climáticas.

Índice de resiliencia ecológica

Este indicador aporta información acerca de la persistencia del cuerpo de agua frente a los cambios en las variables ambientales, debido a causas naturales o antrópicas, para conservar esencialmente la misma función, estructura, identidad y retroalimentación. Desde un punto de vista integral, relaciona las capacidades para digerir los impactos de las actividades estudiadas con su amplitud, mediante los indicadores anteriores. Un valor más alto de este índice adimensional revela una mayor resiliencia, según la siguiente ecuación (García-Ayllón, 2017):

Impact fragmentation indicator

It allows knowing how anthropic changes affect the lagoon's surrounding area. It is a dimensionless index that relates the anthropic impacts in the perimeters and the lagoon surface. A high value indicates a greater degree of impact dispersion or fragmentation. This indicator was calculated by applying the following equation (García-Ayllón, 2017):

$$IFI = \sum_i \frac{L_i}{S_{Ai}} \times \sqrt{S_L} \quad (6)$$

Where: IFI: impact fragmentation indicator; L_i : lagoon limit affected by anthropic activity at the coastal edge i (m); S_{Ai} : area of anthropic activity linked to the lagoon via the coastal edge i (m^2); S_L : surface area of the lagoon (m^2). The area 1,000 m from the coast was established as the zone of affectation by anthropic activity.

Coastal regeneration index

This index relates the possible exogenous causes of the impacts and the lagoon's natural regeneration. It is expressed as the relation between the number and capacity of entry imbalance elements and the recovery elements of the system's natural conditions. All this, while taking climatic impacts into account. The lower the index, the more unsustainable the trend, according to the following equation (García-Ayllón, 2017):

$$IRC = \sum_i \left[\frac{n_{1i}}{n_{2i}} \times \frac{C_{1i}}{C_{2i}} \right] \quad (7)$$

Where: IRC: coastal regeneration index; n_{1i} : number of connections to the open sea or restoration channels; n_{2i} : number of effluents or elements generating anthropic impacts; C_{1i} : physical capacity of the open-sea connections or restoration channels and climatic contributions; C_{2i} : effluent capacity and climate variations.

Ecological resilience index

This indicator provides information about a body of water's persistence in the face of changes in environmental variables due to natural or anthropic causes, with the aim of essentially preserving the same function, structure, identity, and feedback. From a comprehensive point of view, it relates the capacities to absorb the impacts of the studied activities to their amplitude by means of the above-presented indicators. A higher value of this dimensionless index shows a greater resilience, according to the following equation. (García-Ayllón, 2017):

$$IRE = \frac{S_L \times P \times IRC}{\sum S_{Ai} \times IFI \times P_u} \quad (8)$$

Donde: IRE, índice de resiliencia ecológica; S_L , área superficial de la laguna (m^2); P , profundidad media de la laguna (m); IRC, índice de regeneración costera; S_{Ai} , actividades vinculadas a la superficie de la laguna (m); IFI, indicador de fragmentación de impacto y P_u , perímetro urbanizado de laguna (m).

Análisis integrado GIS-LiDAR

En este estudio se aplicó el análisis integrado GIS-LiDAR para el caso de la laguna Las Peonías entre 2011 y 2019 (estimaciones cada dos años), con la finalidad de determinar la evolución temporal de los indicadores y aportar información de base para la recuperación ambiental y gestión integral de este cuerpo de agua. Los datos de las variables ambientales (capacidad de las conexiones abiertas al mar, precipitaciones, capacidad de los efluentes y concentración de los parámetros de calidad de agua) requeridos para los cálculos de los distintos indicadores, se obtuvieron del material documental correspondiente (González *et al.*, 2012; Corona, 2016; Fernández, 2017; Fernández *et al.*, 2017; Meteo-Urbe 1, 2017; Marín-Leal *et al.*, 2019; Ideam, 2021).

RESULTADOS

El análisis de las imágenes satelitales y el uso de la herramienta ArcGis 10.5 permitieron estimar las distintas variables requeridas para calcular los índices de regeneración costera y de resiliencia ecológica en la laguna Las Peonías (Figura 2), particularmente con referencia al área superficial, área del espejo de agua, área de vegetación, zona de afectación a 500 m, zona de afectación a 1000 m, área urbanizada y transformación del terreno. En las Tablas 2, 3 y 4 se detallan los resultados de las variables estimadas para el cálculo de los indicadores de transformación del terreno, de impactos antrópicos y los derivados de la transformación.

Los resultados de los indicadores de transformación del terreno, de impactos antrópicos y los derivados de la transformación, para el período de estudio en la laguna Las Peonías, se resumen en la Tabla 5. Los valores medios de IOC, IAA, IIM, Ti, IFI, IRC e IRE fueron de $0,41 \pm 0,21$ %; $1,15 \pm 0,33$ %; $0,97 \pm 0,09$, $4,65 \pm 3,79$ %; $114,89 \pm 27,33$; $25,04 \pm 29,74$ y $0,02 \pm 0,03$; respectivamente.

En las Tablas 6 y 7 se incluyen los resultados de las variables estimadas para el cálculo de IRC e IRE. La variabilidad temporal de IRC e IRE en la laguna Las Peonías

$$IRE = \frac{S_L \times P \times IRC}{\sum S_{Ai} \times IFI \times P_u} \quad (8)$$

Where: IRE: ecological resilience index; S_L : lagoon surface area (m^2); P : lagoon average depth (m); IRC: coastal regeneration index; S_{Ai} : activities linked to the lagoon surface (m); IFI: impact fragmentation indicator; P_u : urbanized perimeter of the lagoon (m).

Integrated GIS-LiDAR analysis

In this study, integrated GIS-LiDAR analysis was applied to the case of Las Peonías lagoon for the period between 2011 and 2019 (estimations every two years), with the purpose of determining the temporal evolution of the indicators and provide baseline information for environmental recovery and for the integral management of this body of water. The data on the environmental variables (the capacity of open-sea connections, precipitations, effluent capacity, and the concentration of water quality parameters) required to calculate the different indicators were obtained from the corresponding document material (González *et al.*, 2012; Corona, 2016; Fernández, 2017; Fernández *et al.*, 2017; Meteo-Urbe 1, 2017; Marín-Leal *et al.*, 2019; Ideam, 2021).

RESULTS

The analysis of satellite images and the use of the ArcGis 10.5 tool allowed estimating the different variables required to calculate the coastal regeneration and ecological resilience indices of Las Peonías lagoon (Figura 2), in particular reference to the surface area, the water mirror area, the vegetation area, the affectation zone at 500 m, the affectation zone at 1000 m, the urbanized area, and the terrain transformation. Tables 2, 3, and 4 detail the results of the estimated variables for the terrain transformation and anthropic impact indicators, as well as for those derived from transformation.

Table 5 summarizes the results regarding the terrain transformation and anthropic impact indicators and those derived from transformation for the studied period in Las Peonías lagoon. The mean values of IOC, IAA, IIM, Ti, IFI, IRC, and IRE were 0.41 ± 0.21 %; 1.15 ± 0.33 %; 0.97 ± 0.09 , 4.65 ± 3.79 %; 114.89 ± 27.33 ; 25.04 ± 29.74 y 0.02 ± 0.03 ; respectively.

Tables 6 and 7 include the results of the variables estimated to calculate the IRC and IRE. The temporal variability of IRC and IRE in Las Peonías lagoon during

durante el período de estudio se muestra en la Figura 3. De manera general, se observó una tendencia al aumento de los valores de los indicadores entre 2013 y 2019, particularmente de IOC, IAA, IIM, IRC e IRE.

the studied period is shown in Figure 3. Generally speaking, an increasing tendency was observed for the indicator values between 2013 and 2019, particularly for IOC, IAA, IIM, IRC, and IRE.

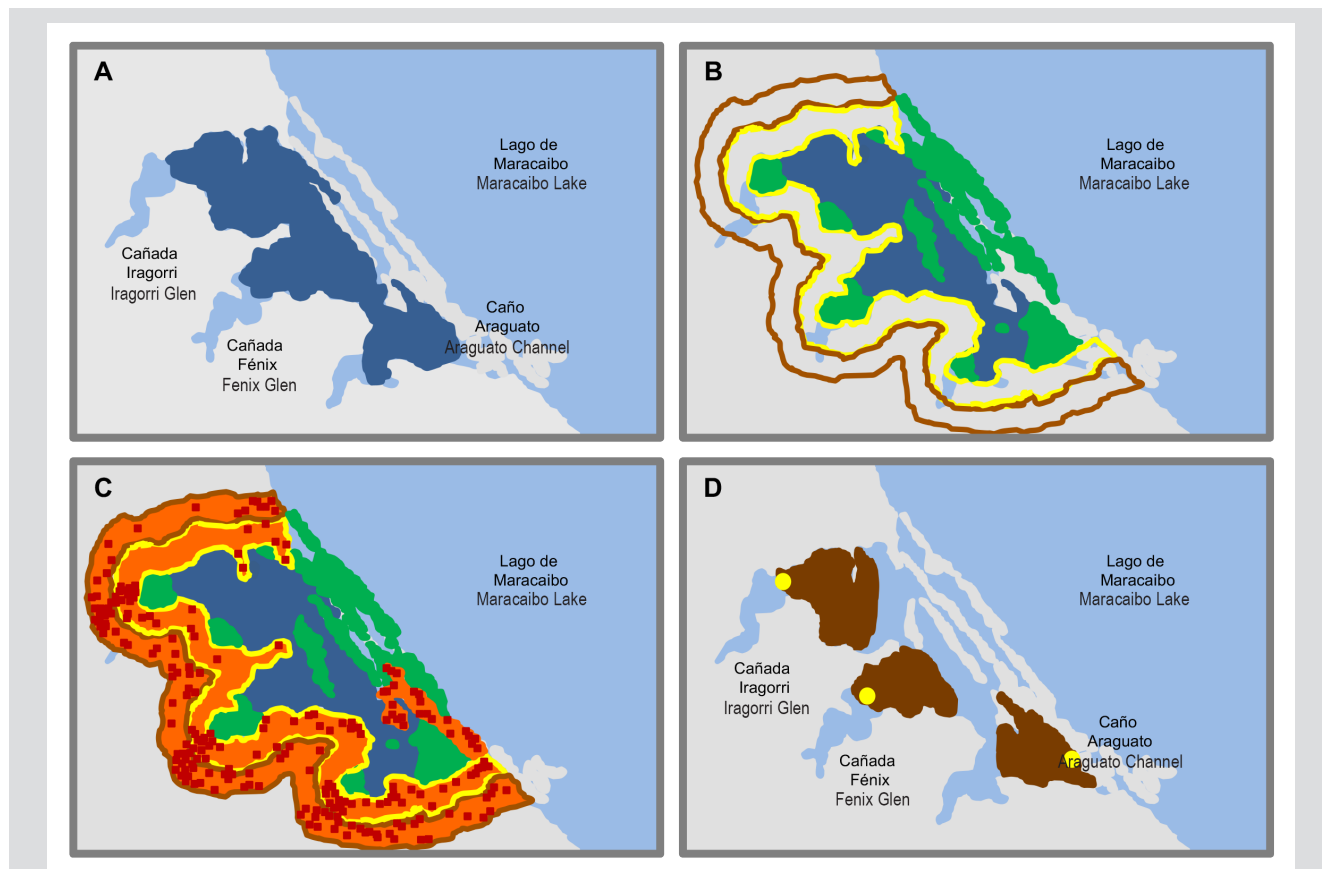


Figura 2. Imágenes que ilustran la definición de algunas variables para la estimación de los indicadores de transformación del terreno, de impactos antrópicos y los derivados de la transformación en la laguna Las Peonías, utilizando imágenes satelitales Landsat TM 7 y el programa ArcGis 10.5. A) Área superficial (azul); B) Espejo de agua (azul), vegetación (verde), área a 500 m (amarillo), área a 1000 m (marrón); C) Espejo de agua (azul), vegetación (verde), área a 500 m (amarillo), área a 1000 m (marrón), zona urbanizada (naranja), terreno transformado (rojo); D) Áreas de afectación (marrón) con su punto de inicio (amarillo) para la cañada Iragorri, cañada Fénix y caño Araguato.

Figure 2. Images illustrating the definition of some variables for estimating the terrain transformation and anthropic impact indicators and those derived from transformation in Las Peonías lagoon, using Landsat TM 7 satellite images and the ArcGis 10.5 software. A) Surface area (blue); B) water mirror (blue), vegetation (green), area at 500 m (yellow), area at 1000 m (brown); C) water mirror (blue), vegetation (green), area at 500 m (yellow), area at 1000 m (brown), urbanized area (orange), transformed terrain (red); D) affectionation areas (brown) with their starting point (yellow) for the Iragorri and Fénix glen and the Araguato channel.

Tabla 2. Índice de ocupación costera (IOC), índice de afección agrícola (IAA) e índice de incidencia mixta (IIM) para la laguna Las Peonías en el período de estudio.

Año / Year	U_A (km ²)	S_A (km ²)	IOC (%)
2011	2.06	8.24	0.25
2013	5.03	10.43	0.48
2015	3.12	9.82	0.32
2017	2.31	9.40	0.25
2019	6.30	8.40	0.75

Table 2. Coastal occupation index (IOC), agricultural affectionation index (IAA), and mixed incidence index (IIM) for Las Peonías lagoon in the studied period.

Año / Year	S_a (km ²)	S_l (km ²)	IAA / AAI (%)
2011	10.64	6.18	1.72
2013	7.38	6.78	1.08
2015	5.97	6.47	0.92
2017	6.30	6.51	0.97
2019	6.71	6.30	1.06
Año / Year	$\sum (S_i \times C_i)$ (km ²)	S_l (km ²)	IIM / MII
2011	6.72	6.18	1.08
2013	6.19	6.78	0.91
2015	5.67	6.47	0.87
2017	6.29	6.51	0.96
2019	6.59	6.30	1.04

$\sum (S_i \times C_i)$: sumatoria de áreas por factor de corrección, S_i : actividad i medida, C_i : factor de corrección para la actividad i, S_l : área superficial de la laguna, S_a : terreno transformado para la agricultura, S_u : área superficial de la laguna, U_a : área urbanizada, S_x : área de referencia a 500 m de la costa.

$\sum (S_i \times C_i)$: sum of areas per correction factor; S_i : measured activity I; C_i : correction factor for activity I; S_l : lagoon surface area; S_a : terrain transformed for agriculture; S_u : lagoon surface area; U_a : urbanized area, S_x : reference area 500 m from the coast.

Tabla 3. Indicador de transformación anual media del terreno (Ti) para la laguna Las Peonías en el período de estudio.

Table 3. Indicator of the average annual transformation of the terrain (Ti) for Las Peonías lagoon in the studied period.

Año / Year	C_1 (ha)	C_2 (ha)	a	Ti (%)
2011	-	-	-	-
2013	617.78	677.94	1	9.74
2015	646.84	677.94	1	4.81
2017	646.84	651.40	1	0.70
2019	630.30	651.40	1	3.35

C_1 : área de terreno consumido (transformación respecto al año anterior), C_2 : transformación de terreno del año correspondiente, a: factor de corrección, -: no aplica.

C_1 : consumed terrain area (transformation with respect to the previous year); C_2 : terrain transformation for the corresponding year; a: correction factor; -: not applicable.

Tabla 4. Indicador de fragmentación de impacto de (IFI) para la laguna Las Peonías en el período de estudio.

Table 4. Impact fragmentation indicator (IFI) for Las Peonías lagoon in the studied period.

Año / Year	L_i (m)	S_{ai} (m ²)	$\sqrt{S_{ai}}$ (m)	IFI
2011	11 140.27	262 378.31	2485.49	105.53
2013	11 150.32	281 676.78	2603.73	103.07
2015	11 047.50	298 223.72	2543.30	94.21
2017	8794.53	137 862.31	2552.24	162.81
2019	11 848.84	273 283.58	2510.58	108.85

L_i : límite costero afectado por la actividad antrópica, S_{ai} : área costera de la actividad antrópica, S_l : área superficial de la laguna.

L_i : coastal limit affected by anthropic activity; S_{ai} : coastal area for anthropic activity; S_l : lagoon surface area.

Tabla 5. Resumen de los indicadores de transformación del terreno, de impactos antrópicos y derivados de la transformación, estimados para la laguna Las Peonías en el período de estudio.

Table 5. Summary of the terrain transformation and anthropic impact indicators, as well as those derived from transformation, estimated for Las Peonías lagoon in the studied period.

Año / Year	IOC (%)	IAA (%)	IIM	Ti (%)	IFI
2011	0.25	1.72	1.08	-	105.53
2013	0.48	1.08	0.91	9.74	103.07
2015	0.32	0.92	0.87	4.81	94.21
2017	0.25	0.97	0.96	0.71	162.81
2019	0.75	1.06	1.04	3.35	108.85
Media / Mean	0.41	1.15	0.97	4.65	114.89
Desviación estándar / Standard deviation	0.21	0.33	0.09	3.79	27.33

IOC: índice de ocupación costera, IAA: índice de afectación agrícola, IIM: índice de incidencia mixta, Ti: indicador de transformación anual media del terreno, IFI: indicador de fragmentación de impacto, -: no estimado.

IOC: coastal occupation index; IAA: agricultural affection index; IIM: mixed incidence index; Ti: average annual terrain transformation indicator; IFI: impact fragmentation indicator; -: not estimated.

Tabla 6. Índice de regeneración costera (IRC) para la laguna Las Peonías en el período de estudio.

Año / Year	n_{1i}	n_{2i}	C_{1i}	C_{2i}	IRC
2011	1	2	169 591.58	1125	75.37
2013	1	2	1030.26	1125	0.46
2015	1	2	12 479.97	1125	5.55
2017	1	2	49 303.84	1125	21.91
2019	1	2	49 303.84	1125	21.91

n_{1i} : número de conexiones a mar abierto o canales de restauración, n_{2i} : número de efluentes o elementos que generan impactos antrópicos, C_{1i} : capacidad física de las conexiones al mar o canales de restauración y aportes climáticos, C_{2i} : capacidad de los efluentes y variaciones climáticas.

Table 6. Coastal regeneration index (IRC) for Las Peonías lagoon in the studied period.

n_{1i} : number of open-sea connections or restoration channels; n_{2i} : number of effluents or elements generating anthropic impacts; C_{1i} : physical capacity of the open-sea connections or restoration channels and climatic contributions; C_{2i} : effluent capacity and climate variations.

Tabla 7. Índice de resiliencia ecológica (IRE) para la laguna Las Peonías en el período de estudio.

Año / Year	S_L (m ²)	P (m)	IRC	S_{Ai} (m ²)	IFI	P_u (m)	IRE
2011	6.17×10^3	0.67	75.37	262 378.31	105.53	148 089.37	7.61×10^{-2}
2013	6.78×10^3	0.67	0.46	281 676.78	103.07	216 337.39	0.33×10^{-3}
2015	6.47×10^3	0.67	5.55	298 223.72	94.21	286 255.51	2.99×10^{-3}
2017	6.51×10^3	0.67	21.91	137 862.31	162.81	178 353.99	2.39×10^{-2}
2019	6.30×10^3	0.67	21.91	273 283.58	108.85	163 734.97	1.89×10^{-2}

S_L : área superficial de la laguna, P: profundidad media de la laguna, IRC: índice de regeneración costera, S_{Ai} : área costera de la actividad antrópica, IFI: indicador de fragmentación de impacto, P_u : perímetro urbanizado de la laguna.

Table 7. Ecological resilience index (IRE) for Las Peonías lagoon in the studied period.

S_L : lagoon surface area; P: average depth of the lagoon; IRC: coastal regeneration index; S_{Ai} : coastal anthropic activity index; IFI: Impact fragmentation indicator; P_u : urbanized perimeter of the lagoon.

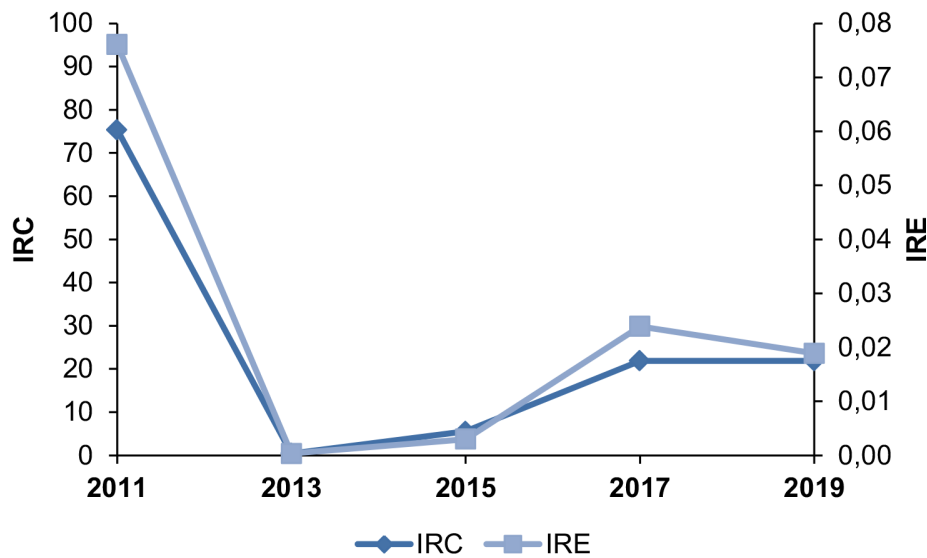


Figura 3. Variabilidad temporal de los índices de regeneración costera (IRC) y de resiliencia ecológica (IRE) en la laguna Las Peonías durante el período de estudio.

Figure 3. Temporal variability of the coastal regeneration (IRC) and ecological resilience (IRE) indices for Las Peonías lagoon during the studied period.

DISCUSIÓN

Indicadores de transformación del terreno y de impactos antrópicos

La evolución temporal del IOC mostró un incremento entre 2011 (0,25 %) y 2019 (0,75 %), como evidencia del aumento progresivo de las áreas urbanizadas alrededor de la laguna (Tablas 2 y 5), con variaciones en función de la situación socioeconómica nacional e incremento de la densidad poblacional. En tal sentido, los valores de U_A aumentaron desde 2,06 (2011) hasta 6,30 (2019) km^2 , mostrando la magnitud del desarrollo urbano en la zona de afectación de este cuerpo de agua. En contraste, el IAA exhibió un decrecimiento durante este período de tiempo (de 1,72 a 1,06 %), en respuesta a la transformación del terreno y la reducción de las zonas agrícolas adyacentes (Tablas 2 y 5). En este sentido, para la población de esta área se ha registrado un índice de sostenibilidad social bajo de 0,52, que proviene de la interpretación matemática de indicadores, como: condición de vida de los productores, nivel educativo, nivel de salud, índice de pobreza y participación ciudadana, lo que refleja una alta inestabilidad social en las actividades agrícolas (Villalobos *et al.*, 2007). Esta característica social se vio reflejada en el IAA, mostrando el relativo bajo impacto de la agricultura como actividad antrópica en el área circundante.

En cuanto al IIM, se presentó una fluctuación relativamente baja de los valores, cuyo máximo de 1.08 se obtuvo en 2011 (Tablas 2 y 4), como resultado del término S_L que exhibió su menor magnitud en este período de tiempo, debido a la reducción del área de la laguna producto de una sequía prolongada (Reliefweb, 2014; Fernández, 2017; Meteo-Urbe 1, 2017; Ideam, 2021). En general, como el impacto antrópico de las actividades identificadas para el cálculo de este índice fue relativamente constante en el tiempo, se obtuvo una relativa estabilidad de los valores en los años subsiguientes. El indicador T_i , por su parte, presentó alta variabilidad en el período de estudio con un mínimo de 0,71 % en 2017 y un máximo de 9,74 % en 2013 (Tablas 3 y 5), reflejando la dinámica urbana y tal vez la baja precisión durante la delimitación de las zonas de transformación en las imágenes satelitales, por lo que se hace necesario un análisis conjunto con los indicadores anteriores y una comparación del comportamiento del cuerpo de agua en el período de estudio, a fin de identificar los factores que influyeron sobre estos valores, de acuerdo a lo expuesto por García-Ayllón (2017). Al respecto, Dobson *et al.* (2021)

DISCUSSION

Terrain transformation and anthropic impact indicators

The temporal evolution of the IOC showed an increase between 2011 (0.25 %) and 2019 (0.75 %), as evidence of the progressive increment in urbanized areas around the lagoon (Tables 2 and 5), with variations as a function of the national socioeconomic situation and an increased population density. In this sense, the U_A values increased from 2.06 (2011) to 6.30 (2019) km^2 , showing the magnitude of urban development in the affectation zone of this body of water. In contrast, the IAA exhibited a decrease during this time period (from 1.72 to 1.06 %), in response to the transformation of the terrain and the reduction of adjacent agricultural zones (Tables 2 and 5). Thus, for the population of this area, a low social sustainability index has been reported (0.52), which stems from the mathematical interpretation of indicators such as the life conditions of producers, the education level, the health level, the poverty index, and citizen participation, which evidences a high social instability in agricultural activities (Villalobos *et al.*, 2007). This social characteristic was reflected on the IAA, showing the relatively low impact of agriculture as an anthropic activity in the surrounding area.

As for the IIM, a relatively low fluctuation in the values was observed, whose maximum (1.08) was obtained for 2011 (Tables 2 and 4), as a result of S_L , which reported its lowest magnitude in this period of time due to the reduction of the lagoon area stemming from a prolonged drought (Reliefweb, 2014; Fernández, 2017; Meteo-Urbe 1, 2017; Ideam, 2021). Generally speaking, as the anthropic impact of the identified activities with regard to calculating this index was relatively constant over time, there was a relative stability in the values for the subsequent years. The T_i indicator, in turn, showed a high variability during the studied period, with a minimum of 0.71 % in 2017 and a maximum of 9.74 % in 2013 (Tables 3 and 5), evidencing urban dynamics and perhaps low precision in delimiting the transformation areas from satellite images, which is why a combined analysis with the previous indicators is necessary, as well as a comparison of the body of water's behavior during the studied period, with the purpose of identifying the factors that influenced these values according to that presented by García-Ayllón (2017). In this regard, Dobson *et al.* (2021) recommend that GIS analyses be accompanied by site-level assessments in

recomiendan que los análisis GIS sean acompañados de evaluaciones a nivel del sitio para corroborar los resultados y desarrollar planes detallados de diseño e ingeniería. De esta manera, los resultados están limitados por los datos disponibles en el momento del análisis y por la exactitud y precisión subyacentes de las fuentes de datos originales; por lo tanto, es posible que el análisis no capture todas las amenazas relacionadas con las inundaciones, los bienes de la comunidad, los recursos pesqueros y la vida silvestre o las áreas de espacios abiertos. El análisis conjunto de los indicadores de transformación del terreno y de impactos antrópicos devela la carencia de políticas de planificación urbana y gestión de los recursos hídricos en Venezuela, con una marcada dinámica en función del crecimiento poblacional y la ocupación del terreno sin considerar la afectación al entorno, lo que ha originado un problema ambiental de larga data en la laguna Las Peonías.

Indicadores derivados de la transformación

El IFI con valores altos y variables, entre 94,21 (2015) y 162,81 (2017) (Tablas 4 y 5), mostró un grado de dispersión elevado del total de los impactos antrópicos respecto a la superficie del territorio, entendiéndose como una fragmentación geográfica que afecta a la cuenca de la laguna. El proceso de fragmentación ecológica implica la aparición de discontinuidades en los ecosistemas; lo que era originalmente una porción continua de ecosistema se transforma en un conjunto de fragmentos desconectados y aislados entre sí (Santos y Tellería, 2006; Quintero-Ángel *et al.*, 2012), implicando una ruptura de la estructura ecosistémica con la focalización de microambientes independientes y disfuncionales.

El IRC mostró niveles altamente variables entre 0,46 (2013) y 75,37 (2011), con valores alrededor de 22 hacia finales del período de estudio (Figura 3). Estos cálculos integran una serie de características del ecosistema que se pueden detallar, como sigue: *i)* los términos n_1 y n_2 representan los aportes de naturaleza restaurativa y de tipo antrópico, respectivamente (Tabla 6); y *ii)* los términos C_1 y C_2 reflejan las capacidades volumétricas de los afluentes. Así, la magnitud de C_1 no solo varía por el ingreso de agua proveniente del Lago de Maracaibo a través del caño Araguato, sino también por las precipitaciones que caen sobre la cuenca, mientras que C_2 depende de los caudales de las cañadas Iragorri y Fénix provenientes de las zonas urbanas e industriales aledañas, que son de flujo relativamente constante (Iclam, 2004, 2005; Mora, 2009; Corona, 2016; Minec, 2018). Considerando lo anterior, los

order to corroborate the results and develop detailed design and engineering plans. Thereupon, the results are limited by the data available at the time of analysis and by the accuracy and precision underlying the original data source. Therefore, the analysis might not capture all the threats related to floods, community assets, fishing resources, and wildlife or areas with open spaces. The combined analysis of the terrain transformation and anthropic impact indices reveals a lack of policies for urban planning and water resources management in Venezuela, with marked dynamics as a function of population growth and the occupation of the terrain while disregarding affectations to the environment, which has caused a longstanding environmental problem in Las Peonías lagoon.

Indicators derived from transformation

The IFI, with high and variable values between 94.21 (2015) and 162.81 (2017) (Tables 4 and 5), showed a high degree of dispersion for the total anthropic impacts with respect to the surface of the territory, understood as a geographical fragmentation that affects the lagoon watershed. The ecological fragmentation process implies the appearance of discontinuities in ecosystems; what once was a continuous portion of an ecosystem becomes in a set of disconnected and isolated fragments (Santos and Tellería, 2006; Quintero-Ángel *et al.*, 2012), implying the breaking of the ecosystem structure, with the focalization of independent and dysfunctional micro-environments.

The IRC showed highly variable levels, *i.e.*, between 0.46 (2013) and 75.37 (2011), with values around 22 towards the end of the studied period (Figure 3). These calculations integrate a series of ecosystem characteristics that can be detailed as follows: *i)* the terms n_1 and n_2 represent the contributions of a restorative nature and those of anthropic origin, respectively (Table 6); and *ii)* the terms C_1 and C_2 reflect the volumetric capacities of the tributaries. Thus, the magnitude of C_1 varies not only because of the entry of water from Maracaibo lake via the Araguato channel, but also due to the precipitations falling on the watershed, whereas C_2 depends on the flows of the Iragorri and Fénix glen stemming from the neighboring urban and industrial areas, which have a relatively constant stream (Iclam, 2004, 2005; Mora, 2009; Corona, 2016; Minec, 2018). Considering the above, the low IRC values observed between 2013 and 2015 are the result of the minimal precipitation levels in the area, among other factors (Reliefweb, 2014; Corona, 2016; Fernández, 2017; Meteo-Urbe 1, 2017; Ideam, 2021), followed by a recovery

bajos valores de IRC durante 2013 y 2015 resultaron, entre otros factores, de los mínimos niveles de precipitaciones en el área (Reliefweb, 2014; Corona, 2016; Fernández, 2017; Meteo-Urbe 1, 2017; Ideam, 2021), seguidos de una recuperación en la regeneración del ecosistema con la llegada de las lluvias hacia principios de 2016.

El IRE en la laguna evidenció una marcada variabilidad durante el tiempo de estudio, en correspondencia con el IRC, cuyo nivel mínimo de $< 0,01$ se observó en 2013 (Figura 3 y Tabla 7), precedido del valor máximo en 2011 (0,08), debido a la posible acumulación de eventos perturbadores como la magnificación de las áreas urbanizadas (IOC) y las actividades antrópicas (S_{Ai}), así como a la disminución de la capacidad de regeneración (Tabla 5). El análisis de los distintos términos del IRE (Ecuación 8), destaca que la disminución de las precipitaciones afectó negativamente la resiliencia ecológica de la laguna, en función de su capacidad para asimilar los impactos antrópicos en su área de afectación. La correspondencia entre IRC e IRE expresa que ante una perturbación el grado de afectación depende de la resiliencia ecológica, requiriéndose un período de autoorganización y recuperación mediante cambios internos, dependientes de la capacidad de regeneración e involucrando el nivel de perturbación (natural o antrópica), el tiempo transcurrido, la duración de los eventos perturbadores, entre otros (Gunderson, 2000; Gunderson y Holling, 2002), hasta llegar a un estado de equilibrio, a partir del cual comienza a aumentar el grado de resiliencia, debido a que no es una propiedad absoluta y fija, por el contrario, es variable en el tiempo y el espacio; depende en gran medida de la posición geográfica, volatilidad ambiental y fuentes regenerativas (Holling, 1986, 1992, 1996; Gunderson, 2000). Adicionalmente, las desestabilizaciones y perturbaciones provocadas por fuentes puntuales de contaminación en la cuenca de la laguna, que corresponden principalmente a las cañadas, básicamente como descargas de aguas residuales domésticas e industriales no tratadas con caudales de 375 y 750 l/seg (Iclam, 2004, 2005; González *et al.*, 2007; Hidrolago, 2015; Corona, 2016), respectivamente, agregan sustancias contaminantes que deben disiparse y asimilarse por intermedio de las fuentes regenerativas, disminuyendo la habilidad para desarrollar e incrementar la capacidad de adaptación del ecosistema ante las continuas transformaciones sufridas en los últimos años.

A partir de 2015 se observó una recuperación débil del IRE, en comparación de los niveles de 2011,

regarding ecosystem regeneration with the advent of rainfall in early 2016.

The IRE of the lagoon evidenced a marked variability during the studied period, in correspondence with the IRC, whose maximum level of < 0.01 was observed in 2013 (Figure 3 and Table 7), preceded by the maximum value for 2011 (0.08), due to the possible accumulation of upsetting events such as the magnification of urbanized areas (IOC) and anthropic activities (S_{Ai}), as well as a decrease in regeneration capabilities (Table 5). The analysis of the different terms of the IRE (Equation 8) reveals that the decreased precipitations negatively affected the lagoon's ecological resilience with regard to its ability to assimilate the anthropic impacts in its affectation area. The correspondence between the IRC and the IRE allows stating that, in the face of a perturbation, the degree of affectation is dependent on ecological resilience, requiring a period of self-organization and recovery by means of internal changes that in turn depend on the regeneration capacity and involve the perturbation level (natural or anthropic), the time elapsed, and the duration of upsetting events, among others (Gunderson, 2000; Gunderson and Holling, 2002). All this, until a state of equilibrium is reached, from which the resilience level begins to increase, as it is not an absolute and fixed property. On the contrary, it is variable in time and space, and it depends, to a large extent, on the geographical position, on environmental volatility, and on regeneration sources (Holling, 1986, 1992, 1996; Gunderson, 2000). In addition, the destabilization and perturbations caused by specific pollution sources in the lagoon's watershed, which mainly correspond to the glen, basically in the form of nontreated domestic and industrial wastewater discharges with flows of 375 y 750 l/sec, respectively (Iclam, 2004, 2005; González *et al.*, 2007; Hidrolago, 2015; Corona, 2016), add polluting substances that must be dissipated and assimilated by means of regeneration sources, hindering the ability to develop and increase the ecosystem's capacity to adapt in the face of the continuous transformations experienced in recent years.

Starting in 2015, a weak recovery was observed in the IRE, in comparison with the levels reported for 2011. It was accompanied by increased IRC values (Figure 3 and Table 7), as a result of the dominance of regeneration sources in the lagoon, which include *i*) water from rainfall (considering frequency and intensity), particularly in 2017; and *ii*) water from the Maracaibo lake, which enters by means of the tidal channel, *i.e.*, Araguato (Figure 1). This

acompañada del aumento de los valores del IRC (Figura 3 y Tabla 7), como resultado del dominio de las fuentes regenerativas en la laguna, entre las que se encuentran: *i*) el agua proveniente de las lluvias (considerando frecuencia e intensidad), particularmente en 2017; y *ii*) el agua del Lago de Maracaibo que ingresa por medio del canal de marea; el caño Araguato (Figura 1). Este caño ha mostrado gran impacto en la capacidad de regeneración de la laguna, ya que a medida que se avanza hacia el espejo de agua (alejándose del lago), se observa una disminución gradual en la calidad del agua (Iclam, 2004, 2005; Mora, 2009; Marín-Leal *et al.*, 2019), siendo la presencia de la macrofita *Lemna* sp. y de otras plantas acuáticas, la posible causa de la reducción del flujo a través de este canal (González *et al.*, 2007). Así, la resiliencia y la sustentabilidad de los ecosistemas acuáticos están directamente relacionadas con las consecuencias de las transformaciones en el largo plazo y con el cambio interno en el corto plazo, por lo cual, cuanto menor sea el IRE más insostenible será la tendencia de sustentabilidad en el tiempo (Calvente, 2007). A este respecto, Campbell *et al.* (2019) y Pelletier *et al.* (2020) exponen la importancia de gestionar los factores de estrés que afectan negativamente la resiliencia de los sistemas acuáticos, así como comprender los ciclos ambientales y climáticos, y los cambios que afectan al recurso. La resiliencia acuática puede mejorarse manteniendo y mejorando la conectividad del hábitat, así como la redundancia funcional y la diversidad física y biológica. La gestión para la resiliencia requiere la implementación de una gestión adaptativa y preferiblemente colaborativa, mediante el desarrollo de un marco de monitoreo efectivo para detectar cambios clave en el ecosistema.

Comparación de los indicadores de resiliencia ecológica entre distintas lagunas costeras

En la Tabla 8 se presentan los indicadores de transformación del terreno, de impactos antrópicos y los derivados de la transformación para la laguna de Las Peonías y otras lagunas costeras del mundo: Mar Menor (España), Mar Chica (Marruecos) y Mar Salton (EE.UU.), lo cual permite realizar un análisis comparativo considerando cuerpos de aguas de diferentes regiones geográficas, con características climáticas, físicas y socioeconómicas contrastantes.

channel has been shown to have a great impact on the lagoon's regeneration capacity since, as one advances towards the water mirror (away from the lake), a gradual decrease in the water quality is observed (Iclam, 2004, 2005; Mora, 2009; Marín-Leal *et al.*, 2019), with the presence of the macrophyte *Lemna* sp. and other aquatic plants being the possible cause for the flow reduction in this channel (González *et al.*, 2007). Thus, the resilience and sustainability of aquatic ecosystems is directly related to the consequences of transformations in the long term and to internal changes in the short term. Therefore, the lower the IRE, the more unsustainable the sustainability trend over time (Calvente, 2007). In this regard, Campbell *et al.* (2019) and Pelletier *et al.* (2020) state the importance of managing the stress factors negatively affecting the resilience of aquatic ecosystems, as well as of understanding the environmental and climatic cycles and changes that affect the resource. Water resilience can be enhanced by maintaining and improving a habitat's connectivity, as well as its functional redundancy and physical and biological diversity. Managing for resilience requires the implementation of adaptive and preferably collaborative handling by developing an effective monitoring framework to detect key changes in ecosystems.

Comparing the ecological resilience indicators of different coastal lagoons

Table 8 presents the terrain transformation and anthropic impact indicators, as well as those derived from transformation, for Las Peonías and other coastal lagoons around the world: Mar Menor (Spain), Mar Chica (Morocco), the Salton Sea (USA). This allows for a comparative analysis that considers bodies of water in different geographical regions, with contrasting climatic, physical, and socioeconomic characteristics.

Tabla 8. Comparación de indicadores de transformación del terreno, de impactos antrópicos y derivados de la transformación entre la laguna de Las Peonías y otras lagunas costeras del mundo.

Indicadores / Indicators	Mar Menor* (España / Spain)	Mar Chica* (Marruecos / Morocco)	Mar Salton* (EE.UU. / USA)	Las Peonías (Venezuela, 2019)
Área / Area (km ²)	1024.6	197.6	2718.7	6.3
IOC (%)	0.67	0.41	0.09	0.75
IAA (%)	4.67	0.47	2.27	1.06
IIM	0.19	0.11	0.02	1.04
Ti (%)	0.07	0.21	0.05	3.35
IFI	0.12	0.13	< 0.01	108.85
IRC	0.61	0.67	0.07	21.91
IRE	0.63	0.41	0.29	0.02

*Datos de García-Ayllón (2017). ICO: índice de ocupación costera, IAA: índice de afectación agrícola, IIM: índice de incidencia mixta, Ti: indicador de transformación anual media del terreno, IFI: indicador de fragmentación de impacto, IRC: índice de regeneración costera, IRE: índice de resiliencia ecológica.

Table 8. Comparison of terrain transformation, anthropic impact, and transformation-derived indicators for Las Peonías and other coastal lagoons around the world.

*Data from García-Ayllón (2017). ICO: coastal occupation index; IAA: agricultural affectation index; IIM: mixed incidence index; Ti: average annual terrain transformation indicator; IFI: impact fragmentation indicator; IRC: coastal regeneration index; IRE: ecological resilience index.

La laguna Mar Menor, con un área de 1 024,6 km², denota una alta densidad de zonas urbanizadas en su entorno, con la mayor cantidad de zonas ocupadas para la agricultura y otras actividades antrópicas que producen un aumento de la fragmentación, exhibiendo valores importantes de regeneración y resiliencia, lo que facilita amortizar y regenerar cualquier impacto negativo producto de la contaminación, sin alterar fuertemente su ecosistema (Tabla 8). La laguna Mar Chica con 197,6 km², posee características similares a la Mar Menor, con la diferencia que su volumen de agua, al ser más reducido, revela un menor grado de resiliencia, por lo que pueden ocurrir cambios a mediano plazo en su ecosistema, generando posibles consecuencias como la desestabilización y eutrofización. La laguna Mar Salton con la mayor área geográfica (2 718,7 km²), presenta la menor área ocupada alrededor de su línea costera, tanto para estructuras urbanas como para la agricultura y actividades antrópicas, como la pesca. A pesar de la posible contaminación y factores que alteran el ecosistema, no hay impactos notables como la fragmentación, al tener un valor de regeneración bajo y siendo su resiliencia lo que ha permitido que no existan cambios drásticos en este cuerpo de agua (García-Ayllón, 2017). En el caso de la laguna Las Peonías, al ser un cuerpo de agua mucho más pequeño (6,3 km²) que los tres anteriores, ubicado próximo a densas zonas urbanizadas, fuertemente influenciado por la acción de la descarga de efluentes no tratados y elevado nivel de fragmentación, exhibe un grado de regeneración apreciable como resultado de sus fuentes regenerativas (agua de lluvia y del Lago de Maracaibo), con un nivel de resiliencia bastante bajo, resultante de la prevalencia de los factores

The Mar Menor lagoon, with an area of 1,024.6 km², shows a high density of urbanized areas in its surroundings, with the highest number of zones occupied for agriculture and other anthropic activities, which entail increased fragmentation, exhibiting significant regeneration and resilience values. This facilitates mitigating and regenerating any negative impact caused by pollution without strongly altering the ecosystem (Table 8). The characteristics of the Mar Chica lagoon, with 197.6 km², are similar to those of Mar Menor. However, its water volume, as it is lower, exhibits a lower degree of resilience, which is why middle-term changes can occur in the ecosystem, with possible consequences such as destabilization and eutrophication. The Salton Sea, with the largest geographical area (2,718.7 km²), shows the lowest occupied coastal line, both for urban structures and agriculture and anthropic activities such as fishing. Despite the possible pollution and factors altering the ecosystem, there are no noticeable impacts such as fragmentation, as the lagoon has a low regeneration value, and its resilience has prevented drastic changes (García-Ayllón, 2017). In the case of Las Peonías lagoon, as it is a much smaller body of water (6.3 km²) and is located next to dense urbanized areas, it is strongly influenced by the discharge of nontreated effluents and a high fragmentation level. It exhibits a noticeable regeneration level, as a result of its regeneration sources (rainwater and Maracaibo lake), with a quite low resilience level stemming from the prevalence of upsetting factors on the regeneration sources, which implies a fragile ecosystem that is susceptible to imbalance. This entails the need for internal changes in

perturbadores sobre las fuentes regenerativas, indicando que es un ecosistema frágil y susceptible al desequilibrio, tenido que generar cambios internos en la búsqueda de un nuevo estado de equilibrio, afectando con ello la supervivencia de las especies biológicas que en él habitan.

Por lo anterior, se evidencia la necesidad de reducir los factores de perturbación debido a las actividades humanas sobre la laguna, ya que si las fuentes regenerativas se ven afectadas en tiempo y espacio por sequía y/u obstrucción del caño Araguato, provocarían que los reducidos niveles de resiliencia no ayuden a evitar el colapso del ecosistema, que puede afectar la disponibilidad del recurso hídrico y de su diversidad biológica. De esta manera, el concepto de resiliencia aplicado a la teoría de conservación biológica actúa como posible indicador del estado ambiental de los ecosistemas acuáticos y su posible aplicación para la sustentabilidad de áreas sensibles a perturbaciones, garantizando la perpetuidad del recurso acuático y protegiendo a las especies autóctonas.

CONCLUSIONES

El análisis integrado GIS-LiDAR mediante el uso de imágenes satelitales e indicadores multifactoriales, permitió estimar la resiliencia ecológica de la laguna Las Peonías de una manera práctica y eficaz, determinando su capacidad para absorber los impactos de las actividades antrópicas y aportando herramientas para la gestión ambiental futura de este cuerpo de agua.

El IOC reflejó el impacto antrópico producido por el aumento progresivo de las áreas urbanizadas. En tanto que el IAA develó un desarrollo reducido de la agricultura en la zona, debido a múltiples factores sociales. La combinación de los efectos de las descargas de las cañadas Iragorri y Fénix, aunado a una sequía prolongada durante el período de estudio, determinaron los niveles del IIM, evidenciando los impactos antrópicos en el cuerpo de agua. El Ti precisó una desaceleración en la transformación del terreno, permitiendo que la laguna recupere territorio, aumentando el espejo de agua y mejorando su capacidad de amortiguación de los impactos. El IFI mostró que la fragmentación es muy elevada, determinando el nivel de dispersión de los impactos. El IRC permitió develar que la laguna está en un proceso regenerativo constante, influenciado por los aportes del caño Araguato y las precipitaciones. No obstante, las fuentes de perturbación: períodos prolongados de sequía y descargas de las cañadas Iragorri y Fénix, determinaron los bajos valores del IRE. En general, durante 2011 se encontró la condición

the search for a new state of equilibrium, thus affecting the survival of the biological species inhabiting this ecosystem.

In light of the above, there is an evident need to reduce upsetting factors due to human activity in the lagoon, given that, if the regeneration sources are affected in time and space by droughts and/or the obstruction of the Araguato channel, the reduced resilience levels would not help to prevent the ecosystem's collapse, which may affect the availability of the water resource and its biological diversity. In this way, the concept of *resilience* applied to biological preservation theory acts as a possible indicator of the environmental state of aquatic ecosystems and is likely applicable to the sustainability of areas sensitive to perturbation, ensuring the perpetuity of the water resource and protecting native species.

CONCLUSIONS

An integrated GIS-LiDAR analysis using satellite images and multi-factor indicators allowed practically and effectively estimating the ecological resilience of Las Peonías lagoon, determining its ability to absorb the impacts of anthropic activities and providing tools for the future environmental management of this body of water.

The IOC evidenced the anthropic impact caused by the progressive increase in urbanized areas. Meanwhile, the IAA showed reduced agricultural development in the area due to multiple social factors. The combined effects of the Iragorri and Fénix glen discharge, together with a prolonged drought during the studied period, determined the IIM levels, evidencing the anthropic impacts on the body of water. The Ti reported a decelerated terrain transformation, allowing the lagoon to recover some territory, increasing the water mirror, and improving its impact absorption capabilities. The IFI showed that fragmentation is very high, which determines the level of impact dispersion. The IRC showed that the lagoon undergoes a constant regeneration process influenced by the Araguato channel and precipitations. Nevertheless, the perturbation sources (prolonged drought periods and the discharge from the Iragorri and Fénix glen) determined the low IRE values. In general terms, during 2011, the most beneficial conditions regarding the IRC and the IRE were found, with the most unfavorable values in 2013, as a result of drought and the occupation and transformation of the adjacent territory.

The low resilience potential of the lagoon depends on a relatively high regeneration capacity, which prepares it

más beneficiosa en cuanto a IRC e IRE, con los valores más desfavorables en 2013, como resultado de la sequía y de la ocupación y transformación del territorio adyacente.

El bajo potencial resiliente de la laguna es dependiente de la relativamente elevada capacidad de regeneración encontrada, preparándola para soportar o amortiguar las perturbaciones sin alterar fuertemente el equilibrio ecosistémico, lo cual lo convierte en un cuerpo de agua impactado y frágil. Aunque se encuentra en constante estado de regeneración, son evidentes los cambios en la calidad ambiental, con una eutrofización generalizada. La desaceleración de este proceso está determinada por el decrecimiento urbanístico e industrial del territorio contiguo, así como por la interrupción del vertido de efluentes no tratados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir abordando la problemática relacionada con el estudio de la capacidad de los ecosistemas lagunares costeros para mantener sus condiciones ambientales ante la acción de perturbaciones externas, mediante el uso de una metodología estandarizada que involucre indicadores de diagnóstico enfocados en el análisis cuantitativo de los cambios estructurales y funcionales desde una perspectiva multidisciplinaria. Esto garantizará la obtención de resultados comparables que sirvan de base para el desarrollo de planes de recuperación ambiental y gestión integral del recurso agua a escala macro.

to endure or mitigate perturbations without strong alterations to the ecosystem balance, which makes it an affected and fragile body of water. Although it is in a constant state of regeneration, there are evident changes in environmental quality, with a generalized eutrophication. The deceleration of this process is determined by the urban and industrial decline of the neighboring territory, as well as by the interruption of nontreated effluent dumping.

RECOMMENDATIONS

We recommend further study of the issues related to coastal lagoon ecosystems' capabilities to maintain their environmental conditions in the face of external perturbations by means of a standardized methodology involving diagnostic indicators focused on a quantitative analysis of structural and functional changes from a multidisciplinary perspective. This will ensure comparable results which will serve as the basis for the development of plans for environmental recovery and the comprehensive management of water resources on a macro scale.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Acevedo, L. y H. Cañas. 1980. Estudio del régimen hidráulico de la laguna Las Peonías. Tesis de grado, Univ. del Zulia, Maracaibo. 72 p.
- Ansari A.A., S.S. Gill, G.R. Lanza and W. Rast. 2011. Eutrophication: causes, consequences and control. Springer Science+Business Media B.V. 401 p. London. UK. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9625-8>
- Anthony, A., J. Atwood, P. August, C. Byron, S. Cobb, C. Foster, C. Fry, A. Gold, K. Hagos, L. Heffner, D.Q. Kellogg, K. Lellis-Dibble, J.J. Opaluch, C. Oviatt, A. Pfeiffer-Herbert, N. Rohr, L. Smith, T. Smythe, J. Swift and N. Vinhateiro. 2009. Coastal lagoons and climate change: ecological and social ramifications in U.S. Atlantic and Gulf coast ecosystems. *Ecol. Soc.*, 14(1): 8-39.
- Baho, D.L., C.R. Allen, A. Garmestani, H. Fried-Petersen, S.E. Renes, L. Gunderson and D.G. Angeler. 2017. A quantitative framework for assessing ecological resilience. *Ecol. Soc.*, 22(3): 17-31. <https://doi.org/10.5751/ES-09427-220317>
- Bellwood, D.R., T.P. Hughes, C. Folke and M. Nyström. 2004. Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429: 837-833. <https://doi.org/10.1038/nature02691>
- Beltrán, J. y J. Rangel. 2013. Modelación del estado trófico del humedal de Jaboque, Bogotá D. C., Colombia. *Acta Biolo. Col.*, 18(1): 1-13.
- Calvente, A. 2007. Resiliencia: un concepto clave para la sustentabilidad. Universidad Abierta Interamericana, Buenos Aires. 4 p.
- Campbell, T., J. Simmons, J. Saenz, C.L. Jerde, W. Cowan, S. Chanda and Z. Hogan. 2019. Population connectivity of adfluvial and stream-resident Lahontan cutthroat trout: implications for resilience, management and restoration. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 76: 426-437. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0483>
- Corona, A. 2016. Modelo hidrogeográfico de la cuenca de la laguna Las Peonías. Tesis de maestría, Univ. del Zulia, Maracaibo. 99 p.
- Decreto 883. 1995. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de aguas y vertidos de efluentes líquidos. Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 5021 extraordinaria, sección III. Caracas, 18 de diciembre de 1995. p. 89-90.



- De Wit, R., P. Chaubron-Couturiera and F. Galletti. 2021. Diversity of property regimes of Mediterranean coastal lagoons in S. France; implications for coastal zone management. *Ocean Coast. Manag.*, 207: 105579. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105579>
- Dobson, G., I. Johnson, V. Kowal, K. Rhodes, K. Byler and B. Lussier. 2021. Guam coastal resilience assessment. UNC Asheville National Environmental Modeling and Analysis Center, Asheville. 63 p.
- Esri. 2012. ArcGIS resource center. <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000v000000.html> 02/11/2019.
- Esri. 2019. Centro de ayuda ArcGIS *online*. <https://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/> 02/11/2019.
- Fernández, A. 2017. Aplicación de índices de calidad y modelaje computacional en la predicción de la calidad de agua de la laguna Las Peonías. Tesis doctoral, Univ. del Zulia, Maracaibo. 253 p.
- Fernández, A., J. Marín, A. Corona, J. Flores, I. González y R. Perozo. 2017. Evolución en la morfología de la laguna Las Peonías: 1979-2016. *Rev. Univ. Zulia · 3ra Época*, 8(21): 41-59.
- Friedland, R., G. Schernewski, U. Gräwe, I. Greipsland, D. Palazzo and Pastuszek M. 2019. Managing eutrophication in the Szczecin (Oder) Lagoon-development, present state and future perspectives. *Front. Mar. Sci.*, 5: 521. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00521>
- García-Ayllón, S. 2017. Integrated management in coastal lagoons of highly complexity environments: resilience comparative analysis for three case-studies. *Ocean Coast. Manag.*, 143: 16-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.10.007>
- Glibert P.M., D.C. Hinkle, B. Sturgis and R.V. Jesien. 2014. Eutrophication of a Maryland/Virginia coastal lagoon: a tipping point, ecosystem changes, and potential causes. *Estuaries Coast.*, 37(1): S128-S146. <https://doi.org/10.1007/s12237-013-9630-3>
- González, M., G. Aldana y A. Fuenmayor. 2007. Mecanismos de variación de la concentración de los nutrientes y del sedimento en la laguna Las Peonías. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 30(especial): 71-81.
- González, M., G. Aldana y L. Saules. 2012. Ciclos de marea y condiciones climáticas sobre la variación del nitrógeno en la laguna Las Peonías. *Bol. Centro Invest. Biol.*, 46(2): 137-157.
- Gunderson, L.H. 2000. Ecological resilience – in theory and application. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 31: 425-439.
- Gunderson, L.H. 2010. Ecological and human community resilience in response to natural disasters. *Ecol. Soc.*, 15(2): 18-29. <https://doi.org/10.5751/ES-03381-150218>
- Gunderson, L.H. and C.S. Holling. 2002. *Panarchy: understanding transformations in systems of human and nature*. Island Press, Washington DC. 274 p.
- Hidrologo. 2015. En la cañada Fénix Hidrologo recolectó 70 toneladas de basura. <http://hidrologo.gov.ve/nota5.html> 13/03/2020.
- Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 4: 1-23.
- Holling, C.S. 1986. The resilience of terrestrial ecosystems: local surprise and global change. 214-223. In: Clark, W.C. and R.E. Munn (Eds.). *Sustainable development of the biosphere*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 517 p.
- Holling, C.S. 1992. Cross-scale morphology, geometry and dynamics of ecosystems. *Ecol. Monogr.*, 62: 447-502.
- Holling, C.S. 1996. Engineering resilience vs. ecological resilience. 32-45. In: Schulze, P.C. (Ed.). *Engineering within ecological constraints*. Natl. Acad., Washington, DC. 156 p.
- Iclam. 1988. Estudio sobre el comportamiento hidrodinámico de la laguna Las Peonías. Informe técnico, Instituto para la Conservación de la Cuenca Hidrográfica del Lago de Maracaibo (Iclam), Maracaibo. 46 p.
- Iclam. 2000. Problemática ambiental del parque Las Peonías. Informe técnico, Instituto para la Conservación de la Cuenca Hidrográfica del Lago de Maracaibo (Iclam), Maracaibo. 7 p.
- Iclam. 2004. Inspección y toma de muestras de agua de la laguna Las Peonías (sector Los Pescadores) y la fosa Los Compatriotas (sector Monte Claro), municipio Mara, estado Zulia. Informe técnico IT-2004-09-053, Instituto para la Conservación de la Cuenca Hidrográfica del Lago de Maracaibo (Iclam), Maracaibo. 6 p.
- Iclam. 2005. Evaluación de la calidad de las aguas en caño Araguato, laguna Las Peonías y cañada Fénix, municipio Maracaibo, estado Zulia. Informe técnico IT-2005-02-005, Instituto para la Conservación de la Cuenca Hidrográfica del Lago de Maracaibo (Iclam), Maracaibo. 12 p.
- Ideam. 2021. Boletín climatológico 2011-2019. <http://www.ideam.gov.co> 01/10/2021.
- Jen, E. 2003. Stable or robust? What's the difference? *Complexity*, 8(3): 12-18. <https://doi.org/10.1002/cplx.10077>
- Kennish, M.J. 2015. Coastal lagoons. 140-143. In: Kennish, M.J. (Ed.). *Encyclopedia of Estuaries*. Springer Science+Business Media, Dordrecht. 760 p. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4_47
- Landsat-7. 2019a. Earth images. <http://earthimages.geocento.com/> 06/11/2019.
- Landsat-7. 2019b. Galería de imágenes Landsat-7. <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-landsat-7/> 06/11/2019.
- Lenzi, M., F. Cianchi. 2022. Summer dystrophic criticalities of non-tidal lagoons: the case study of a Mediterranean lagoon. *Diversity*, 14: 771. <https://doi.org/10.3390/d14090771>
- Ludwig, D., B. Walker and C.S. Holling. 1996. Sustainability, stability and resilience. *Conserv. Ecol.*, 1: 1-27.

- Marín-Leal, J.C., A.M. Fernández-Álvarez, J.B. Flores-Nava, Y. del V. López-Inaudi y Á.E. Corona-Quintero. 2019. Dinámica espaciotemporal de la calidad de agua en la laguna Las Peonías (Zulia, Venezuela): 2013-2016. *Rev. Fac. Cienc. Básicas*, 15(2): 83-106. <https://doi.org/10.18359/rfcb.4204>
- Meteo-Urbe 1. 2017. Laboratorio de observación climatológica de la Urbe. <https://www.urbe.edu/meteo/monthlyrecord.htm> 05/03/2020.
- Minec. 2018. Laguna Las Peonías, parroquia Idelfonso Vásquez, municipio Maracaibo y parroquia Ricaurte, municipio Mara-estado Zulia. Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo (Minec), Unidad Territorial para Ecosocialismo – Zulia, Maracaibo. 65 p.
- Monsalve, G. 2008. Hidrología en la ingeniería, 2^a edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá. 357 p.
- Mora, R. 2009. Variaciones en la composición, abundancia y biomasa de fitoplancton de la laguna de Las Peonías (Edo. Zulia, Venezuela). Trabajo de ascenso, Univ. del Zulia, Maracaibo. 103 p.
- Pelletier, M.C., J. Ebersole, K. Mulvaney, B. Rashleigh, M.N. Gutierrez, M. Chintala, A. Kuhn, M. Molina, M. Bagley and C. Lane. 2020. Resilience of aquatic systems: Review and management implications. *Aquat. Sci.*, 82(2): 1-44. <https://doi.org/10.1007/s00027-020-00717-z>
- Pimm, S.L. 1999. The dynamics of the flows of matter and energy. 172-193. In: McGlade, J. (Ed.). *Advanced ecological theory, principles and applications*. Blackwell Science, London. 346 p.
- Quintero-Ángel, A., D. Osorio-Domínguez y L. Valenzuela. 2012. Algunas reflexiones sobre fragmentación y sus retos para la investigación. *Rev. Biodivers. Neotrop.*, 2(1): 15-20.
- Reliefweb. 2014. Venezuela atraviesa una de las sequías más fuertes de los últimos 60 años. <https://reliefweb.int/report/venezuela-bolivarian-republic/venezuela-atraviesa-una-de-las-sequ-m-s-fuertes-de-los-ltimos> 18/03/2020.
- Santos, T. y J.L. Tellería. 2006. Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas*, 2: 3-12.
- Scapin, L., M. Zucchetta, F. Pranovi and P. Franzoi. 2022. Influence of seascape on coastal lagoon fisheries: the Role of habitat mosaic in the Venice lagoon. *Est. Coast.*, 45: 793-811. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-00986-3>
- Semenov, M.Y., Y.M. Semenov, A.V. Silaev and L.A. Begunova. 2019. Assessing the self-purification capacity of surface waters in Lake Baikal watershed. *Water*, 11: 1505. <https://doi.org/10.3390/w11071505>
- Suárez, C. 2016. Uso y abuso de las lagunas costeras venezolanas. *Rev. Invest.*, 40(87): 63-94.
- USGS. 2020. Earth explorer. United States Geological Survey (USGS). <https://earthexplorer.usgs.gov/> 10/05/2020.
- Villalobos, Y., N. Rincón, W. Gutiérrez y E. Martínez. 2007. Desarrollo sostenible en el sistema de producción de yuca *Manihot esculenta* Crantz del municipio Mara del estado Zulia, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, 24: 367-387.
- Wainger, L.A., D.H. Secor, C. Gurbisz, W.M. Kemp, P.M. Glibert, E.D. Houde, J. Richkus and M.C. Barber. 2017. Resilience indicators support valuation of estuarine ecosystem restoration under climate change. *Ecosyst. Health Sust.*, 3(4): 26-32. <https://doi.org/10.1002/ehs2.1268>

RECIBIDO / RECEIVED: 18/02/2022

ACEPTADO / ACCEPTED: 30/03/2023