

INCORPORACIÓN DEL ANÁLISIS ESPACIAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS Y SU IMPACTO EN EL SISTEMA DE LAGUNAS INTERDUNARIAS DE LA CIUDAD DE VERACRUZ, MÉXICO

Spatial analysis of waste characterization and its impact on the interdunary lagoon system of Veracruz City, Mexico

Pedro César REYNA-GONZÁLEZ*, Dora Estefanía PAREDES-LIZAMA, Fabiola LANGO-REYNOSO, María del Refugio CASTAÑEDA-CHÁVEZ y Jesús MONTOYA-MENDOZA

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Boca del Río, km 12 carretera Veracruz- Córdoba, 94290 Boca del Río, Veracruz, México.

*Autor para correspondencia: pedro.rg@bdelrio.tecnm.mx

(Recibido: junio de 2021; aceptado: marzo de 2022)

Palabras clave: ecosistema, servicios ambientales, contaminación, impacto, amenaza.

RESUMEN

El Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz (SLICV) forma parte de los ecosistemas naturales conocidos como sitios Ramsar, cuyo objetivo se centra en la conservación de funciones ecológicas. Este sistema, ubicado en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río, está constituido por 18 lagunas consideradas “poco frecuentes”, ya que son cuerpos de agua dulce, someros y proveen diferentes servicios ecosistémicos a los habitantes de la zona. La pérdida gradual de dichos servicios ecosistémicos se debe a diversas fuentes de presión antrópica (por ejemplo, el cambio en el uso del suelo, falta de infraestructura de saneamiento, incremento de contaminantes y residuos). La presente investigación tuvo como objetivo la caracterización de los residuos que se vierten en el SLICV y su impacto sobre los diferentes servicios ecosistémicos de cada laguna. Los 18 sitios de muestreo se delimitaron geográficamente con un análisis espacial mediante sistemas de información geográfica (SIG). Se identificaron cuatro tipos de residuos, de los cuales el sólido urbano fue el más predominante. El servicio ecosistémico de regulación fue el más impactado en casi todas las lagunas.

Key words: ecosystem, environmental services, pollution, impact, threat.

ABSTRACT

The Interdunary Lagoons System of the city of Veracruz (SLICV) is part of the natural ecosystems known as Ramsar sites, whose objective is focused on the conservation of ecological functions. This system comprises 18 lagoons in the Veracruz-Boca del Río metropolitan area, which are considered “infrequent” since they are fresh and shallow water bodies that provide different ecosystem services to the inhabitants of the area. The progressive loss of this services is due to various sources of anthropogenic pressure (for example, land-use change, lack of sanitation infrastructure, and increase of pollutants and dumped waste). The objective of this research was to characterize the waste dumping into the SLICV and its impact on the different ecosystem services of each lagoon. The 18 sampling sites were geographically delimited with a spatial analysis

using Geographic Information Systems (GIS). Four types of waste were identified, being the urban solid the most predominant type. The regulation ecosystem service was the most impacted in almost every lagoon.

INTRODUCCIÓN

México es uno de los países más extensos del mundo y tiene una gran diversidad de ecosistemas, por lo que es considerado uno de los 17 países megadiversos según el Centro de Monitoreo de la Conservación del Ambiente (Llorente-Bousquets y Ocegueda 2008). En la República Mexicana existen actualmente 142 sitios designados como humedales de importancia internacional con una superficie de 8657057 ha y múltiples servicios ecosistémicos muy importantes para el equilibrio ecológico del planeta (Costanza et al. 1998, Ramsar 2004). Las funciones y valores reconocidos de los humedales son los siguientes: hábitat para vida silvestre y acuática; lugares de enseñanza, investigación y recreación; reciclaje y transformación de nutrientes; flujos de agua ante inundaciones; retención de partículas y contaminantes; estabilización de los suelos, y ser uno de los ecosistemas con mayor productividad en el mundo (WRI 2005).

El Sistema de Lagunas Interdunarias de la ciudad de Veracruz (SLICV) se encuentra en el estado de Veracruz y forma parte de los espacios naturales protegidos conocidos como sitios Ramsar (Ramsar 2004, 2021). Los principales objetivos de los sitios Ramsar son: carga y recarga del manto freático, retención de sedimentos, mantenimiento de la calidad del agua y soporte para distintos hábitats (Sarabia-Bueno 2004). Algunos registros históricos reportan la existencia de más de 200 lagunas; sin embargo, dada su geomorfología, estas lagunas veracruzanas se clasifican como efímeras o cuerpos de aguas caminantes, es decir, que aparecen y desaparecen en las diferentes temporadas del año, lo cual es su principal característica (Rodríguez-Luna et al. 2011).

Existen actualmente diversas problemáticas que inciden directa e indirectamente sobre este sistema de lagunas interiores: 1) insuficientes aportaciones científicas y metodológicas para atender la problemática ambiental y de contaminación, 2) poca o nula responsabilidad y organización del sector social (autoridades federales y locales encargadas de la vigilancia y monitoreo) y población civil para promover programas para prevenir la contaminación y 3) ausencia de un programa de manejo y monitoreo a corto y largo plazo para verificar y certificar la calidad ambiental (Sarabia-Bueno 2004).

La pérdida gradual de los servicios ecosistémicos del SLICV se debe a diversas fuentes de impacto, siendo la principal de origen antrópico (por ejemplo, cambio de uso de suelo, alta densidad poblacional, incremento del depósito de residuos y contaminantes en las lagunas, poca valorización y falta de planes de manejo para el sistema) (Sarabia-Bueno 2004, Rodríguez-Luna et al. 2011). El SLICV ha sido objeto de desprestigio en cuanto a su valor estético y biológico a lo largo de muchos años debido a la insalubridad, malos olores y enfermedades por la mala calidad del agua (Travieso-Bello y Moreno-Casasola 2006, Rodríguez-Luna et al. 2011).

Los sistemas de información geográfica (SIG) y la percepción remota son herramientas valiosas para la planeación y monitoreo en los humedales costeros (Bello-Pineda y Gómez 2009). El empleo de estas herramientas permite ampliar las capacidades del análisis espacial para identificar y caracterizar problemáticas ambientales que influyen directamente en la calidad de vida de los ecosistemas y la distribución de sus recursos (Fotheringham et al. 2000). Actualmente existe una carencia de datos georreferenciados y de un programa de monitoreo continuo en el SLICV. Esta limitante se refleja en la falta de información espacial, por lo que es importante ubicar y delimitar las fuentes de impactos presentes para reforzar los esfuerzos de vigilancia y lograr una mejor administración de los recursos (Travieso-Bello y Moreno-Casasola 2006, Bello-Pineda y Gómez 2009, Rodríguez-Luna et al. 2011). Asimismo, la generación de un programa de manejo es necesaria para fortalecer los trabajos conjuntos de vigilancia entre las autoridades encargadas y los usuarios locales e investigadores. También es preciso fomentar programas de educación ambiental y difusión para crear conciencia sobre la importancia de estos ecosistemas (Monroy-Ibarra y Travieso-Bello 2006).

El SLICV tiene relevancia biológica y ecológica porque es fuente de abastecimiento de agua y conservación de flora y fauna en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río (Sarabia-Bueno 2004, Rodríguez-Luna et al. 2011, Ramsar 2021). Sin embargo, no existen estudios de análisis espacial sobre la caracterización de los residuos y su impacto sobre el sistema. Estudios previos están fragmentados o no hacen referencia al aspecto ambiental (Monroy-Ibarra

y Travieso-Bello 2006, Bello-Pineda y Gómez 2009). Por lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo realizar la caracterización de los residuos del Sitio Ramsar 1450-Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz mediante el análisis espacial. Así pues, se determinarán el impacto y el grado de amenaza en los servicios ecosistémicos delimitando los cuerpos de agua, y clasificando e identificando los tipos de residuos y su ubicación espacial. El enfoque implementado permitirá desarrollar una propuesta metodológica para la generación de alternativas de manejo y cuidado ambiental de estos ecosistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El SLICV se localiza en el municipio de Veracruz (19° 06' -19°16' N, 96° 06' -96° 20' W) dentro de la zona conurbada Veracruz-Boca del Río (Fig. 1). El sistema lagunar fue decretado como sitio Ramsar en 2005 (RSIS 2020). También ha sido declarado

como área natural protegida (ANP), región terrestre prioritaria (RTP), región marina prioritaria (RMP), y área de importancia para la conservación de las aves (AICAS) (Ramsar 2004).

Fuentes de información geográfica

Para definir la escala inicial de esta investigación se utilizó como base una imagen de satélite del servidor web Google Earth (GE 2020), descargada con la aplicación de cartografía digital SAS Planet (SAS 2020) para ubicar espacialmente el área de estudio. Se delimitaron los polígonos de cada una de las lagunas pertenecientes al SLICV con el programa de acceso libre Google Earth Pro (GE Pro 2020) empleando la herramienta “agregar polígonos” para su posterior digitalización y delimitación. Los polígonos se guardaron como archivos con terminación kml para ser importados al SIG con el programa ArcMap v. 10.3 (ESRI 2015). Se generó un esquema teórico de zonificación del sistema para agrupar y caracterizar las lagunas en tres grandes zonas: norte, centro y sur.

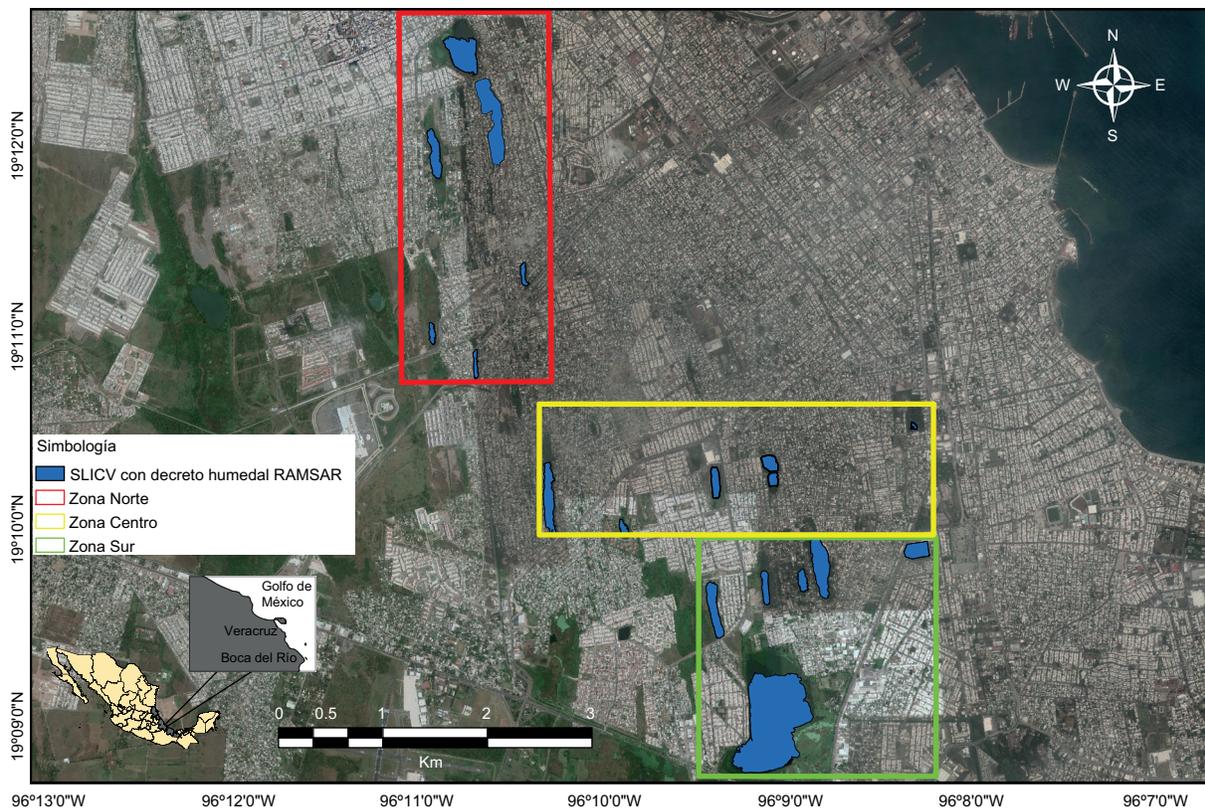


Fig. 1. Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz (SLICV). En rojo se muestran las lagunas de la zona norte; en amarillo, las lagunas de la zona centro; y, en verde, las lagunas correspondientes a la zona sur del SLICV.

Se realizó una aproximación espacial de cada laguna del SLICV con el programa Google Earth Pro (GE Pro 2020) para geoposicionar los puntos donde se localizan los diferentes tipos de residuos que impactan al sistema. Este marcaje se llevó a cabo con el GPS de la interfaz cartográfica de uso libre Google Maps (GM 2020). Posteriormente, se hizo una visita de verificación a los puntos ubicados, considerando el libre acceso y seguridad de estos sitios.

Clasificación de tipos de residuos

A partir del trabajo de campo se generó un sistema de clasificación para describir los diferentes tipos de residuos en cada punto de muestreo, tomando como referencia la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PROFEPA 2003, 2006). Se generó una base de datos con la ubicación espacial de los diferentes tipos de residuos mediante el programa Microsoft Excel 2010. Se generaron capas de información utilizando el SIG ArcMap v. 10.3 (ESRI 2015) con la herramienta “Add XY data”. Posteriormente, dichas capas se exportaron como mapas temáticos que representan la caracterización espacial de los diferentes tipos de residuos presentes en las lagunas de SLICV.

Grado de impacto de los residuos en el SLICV y su tendencia actual

Se generó un análisis de frecuencia para determinar el porcentaje del residuo dominante en cada laguna del SLICV, considerando el número total de sitios puntuales georreferenciados para cada tipo de residuo. Así, se determinó el grado de impacto ambiental sobre los servicios ecosistémicos de cada laguna de acuerdo con las categorías establecidas en el documento Evaluación de ecosistemas del milenio (WRI 2005). La información analizada se utilizó para generar una matriz de impacto cualitativa (Andrade-Hernández et al. 1999). Se compararon los servicios ecosistémicos identificados, el grado de impacto de los residuos sobre estos servicios y la tendencia actual de las amenazas presentes. Lo anterior, de acuerdo con lo establecido en el reporte de impactos y amenazas publicado en la Evaluación de ecosistemas del milenio en los humedales Ramsar (WRI 2005, Bello-Pineda y Gómez 2009).

RESULTADOS

Se identificaron 274 fuentes puntuales de residuos distribuidas espacialmente en las diferentes lagunas del SLICV (**Fig. 2**). De acuerdo con el muestreo en

campo y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PROFEPA 2003). Se identificaron tres tipos de residuos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP). Se propuso además una clasificación nueva llamada residuos mixtos (RM), que es el conjunto de materia orgánica e inorgánica que no se puede caracterizar, clasificar o cuantificar (**Cuadro I**).

Los residuos identificados presentan una distribución heterogénea de acuerdo con la delimitación espacial de cada una de las lagunas del SLICV. Con base en el número de sitios puntuales identificados, cada laguna presenta un residuo predominante con relación a otro (**Cuadro II**). En general, se identificó que los RSU tienen la mayor prevalencia en todo el sistema. La **figura 3** muestra el porcentaje del residuo que predomina en las lagunas del SLICV de las zonas norte, centro y sur.

Con base en la heterogeneidad espacial de los residuos identificados, este sistema se encuentra sometido a diferentes grados de impacto por las fuentes puntuales delimitadas para cada tipo de residuo. Lo anterior representa una amenaza para la provisión de servicios ecosistémicos del SLICV. Todas las lagunas del sistema presentan un alto impacto y una tendencia actual de amenaza alta para dichos servicios, representado en una matriz cualitativa en el **cuadro III**.

DISCUSIÓN

Los humedales brindan grandes beneficios económicos a los pobladores de diversas regiones por su gran cantidad de recursos (por ejemplo, pesca, madera, miel, plantas comestibles y medicinales, entre otros) y servicios ecosistémicos (por ejemplo, control de inundaciones, captura de carbono, aporte de nutrientes a los cuerpos de agua, refugio para especies silvestres y de interés comercial, filtración y limpieza de agua, entre otros) (Mitsch y Gosselink 2000, WRI 2005, De Groot et al. 2007).

La continuidad de los servicios ecosistémicos que provee el SLICV está amenazada por el aumento de los impactos sinérgicos de actividades humanas. Estas actividades incluyen incremento de la población, contaminación, cambio climático y uso de suelo en la zona costera para desarrollos habitacionales (Ramsar 2004, Sarabia-Bueno 2004). Asimismo, la provisión de estos servicios se ve afectada por la extracción de agua del subsuelo, la desecación de los cuerpos de agua dulce, la erosión y el azolve, la construcción de carreteras y pasos a desnivel y la contaminación

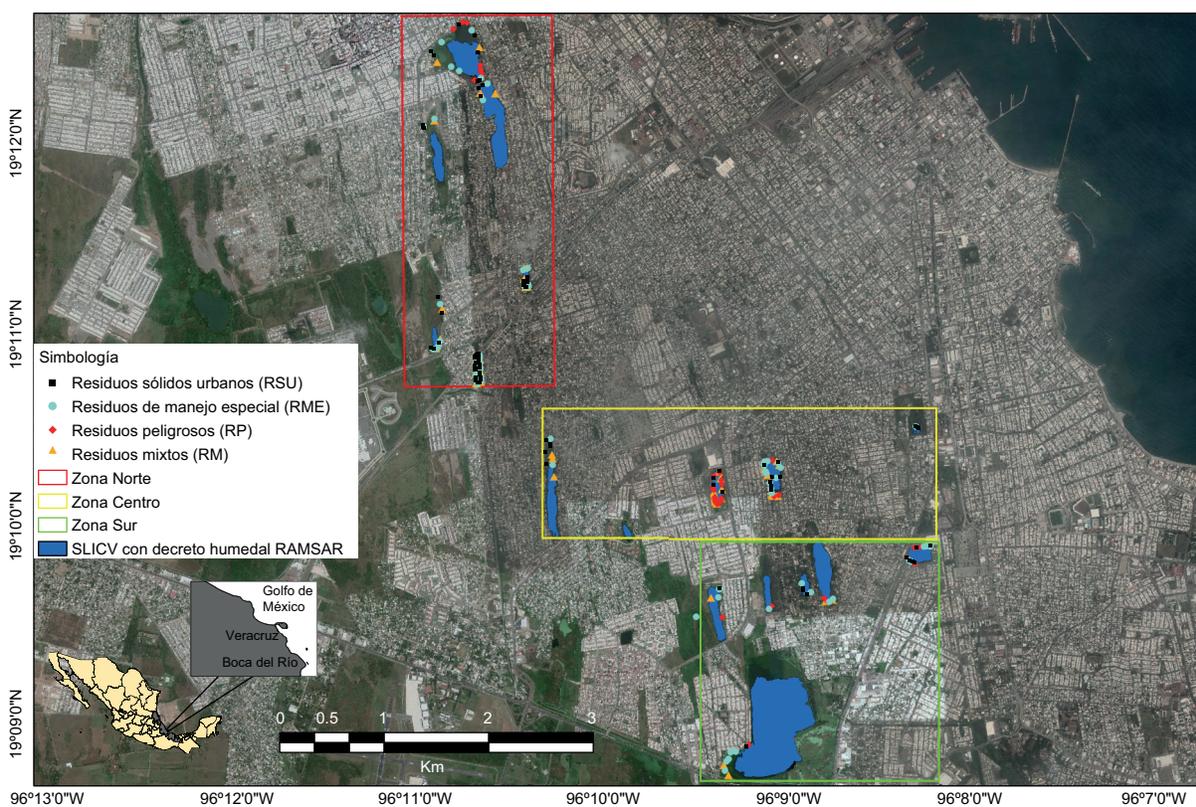


Fig. 2. Distribución espacial de los tipos de residuos identificados en el Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz.

(Landgrave y Moreno-Casasola 2012, López-Ortiz 2015).

De acuerdo con Landgrave y Moreno-Casasola (2012), los humedales mexicanos se distribuyen principalmente en la zona costera. Las lagunas interdunarias no han cobrado la relevancia necesaria para contar con una legislación nacional y/o internacional (sitio Ramsar) que proteja su uso sostenible y garantice su conservación (Mitsch y Gosselink 2000, Junk 2002, Moreno-Casasola 2008, Landgrave y Moreno-Casasola 2012). Por otro lado, los manglares tienen una superficie de 770 057 ha y están protegidos en un 45.2 % como reservas federales o estatales (Rodríguez-Zúñiga et al. 2013).

Sarabia-Bueno (2004) estableció que las lagunas del SLICV son consideradas como hábitats críticos con atributos especiales de unicidad y biodiversidad. Los servicios ecosistémicos de carga y recarga del manto freático y retención de sedimentos mantienen la calidad del agua y son soporte para distintos hábitats. Estos son sitios de descanso para aves migratorias y de reproducción de organismos locales. Además, tienen influencia en las condiciones

microclimáticas del área sirviendo para diferentes actividades humanas como pesca de autoconsumo, recreación y mejoramiento de la calidad de vida. No obstante, durante muchas décadas, han sido considerados por la sociedad como lugares inmundos e insalubres donde la abundancia de plagas y las condiciones de inaccesibilidad constituyen un freno a su conocimiento, funciones y beneficios (Travieso-Bello et al. 2006, Rodríguez-Luna et al. 2011). Lo anterior ocasionó que muchos humedales de la zona conurbada fueran desecados o transformados para uso agrícola, ganadera y otras actividades económicas (Chong-Garduño 2019).

Las causas principales de la desaparición progresiva del SLICV son el crecimiento urbano y la sobreexplotación de los recursos. Estos fenómenos se han desarrollado progresivamente desde la fundación de la ciudad de Veracruz, pero en los últimos 100 años han tenido graves consecuencias y en la actualidad ponen en riesgo no sólo a la ciudad, sino a su población, incrementando la fragilidad y disponibilidad de los servicios ecosistémicos del SLICV (Sarabia-Bueno 2004, Chong-Garduño 2019).

CUADRO I. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE RESIDUOS IDENTIFICADOS EN EL SISTEMA DE LAGUNAS INTER-DUNARIAS DE LA CIUDAD DE VERACRUZ (SLICV).

Tipos de residuos	Descripción	Ejemplo	Fuente	Identificados en el SLICV
Residuos sólidos urbanos (RSU)	<p>Son aquellos generados en las casas habitación que resultan de materiales de actividades domésticas, productos consumibles y envases, embalajes o empaques.</p> <p>Son residuos con características domiciliarias de establecimientos o vía pública y resultantes de la limpieza de vías o lugares públicos. Se clasifican en orgánicos e inorgánicos conforme a los programas estatales y municipales para la prevención y la gestión integral de los residuos, así como a los ordenamientos legales aplicables.</p>	<p>Orgánicos: residuos en descomposición, generados por actividades pesqueras, silvícolas, agrícolas, forestales y ganaderas.</p> <p>Inorgánicos: residuos de construcción, mantenimiento y demolición, residuos generados por tiendas departamentales o centros comerciales, residuos tecnológicos de la industria informática, productos electrónicos, vehículos automotores y plásticos en general.</p>	PROFEPA (2003) PROFEPA (2006)	Basura sólida de diversas fuentes y origen (plástico, vidrio, PET, madera), desechos y materia fecal, cadáveres de diversos animales, material de computación obsoleto, presencia de lirio acuático, descarga de agua negras, residuos de la demolición y chatarra automotriz.
Residuos de manejo especial (RME)	<p>Son aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados peligrosos, residuos sólidos urbanos, o producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.</p>	<p>Residuos de servicios de salud de establecimientos con actividades médico-asistenciales a poblaciones humanas o animales, centros de investigación, con excepción de los biológico-infecciosos.</p> <p>Residuos de los servicios de transporte y los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en las aduanas, lodos y aguas residuales y neumáticos utilizados.</p>	PROFEPA (2003) PROFEPA (2006)	Desechos portuarios y neumáticos.
Residuos peligrosos (RP)	<p>Son aquellos residuos con características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o peligrosidad (por ejemplo, agentes infecciosos).</p> <p>Son envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio.</p>	<p>Aceites lubricantes usados, disolventes orgánicos usados, convertidores catalíticos y acumuladores de vehículos automotores, fármacos, plaguicidas y sus envases remanentes, residuos de hospitales (sangre y sus derivados), cepas y cultivos de agentes patógenos, residuos patológicos, y residuos punzocortantes (navajas de bisturí, lancetas, jeringas y agujas hipodérmicas, de acupuntura y para tatuajes).</p>	PROFEPA (2003) PROFEPA (2006)	Residuos de origen hospitalario e infecciosos.
Residuos mixtos (RM)	<p>Conjuntos de materia orgánica e inorgánica que no se pueden caracterizar, clasificar o cuantificar, tomando como referencia los RSU y RME.</p>	<p>Conglomerados de diferentes tipos de residuos en proporciones heterogéneas y de distinto origen o naturaleza.</p>	Paredes-Lizama (2019)	Desechos mixtos en estado de desintegración parcial o total.

CUADRO II. PORCENTAJE DE TIPOS DE RESIDUOS IDENTIFICADOS EN EL SISTEMA DE LAGUNAS INTERDUNARIAS DE LA CIUDAD DE VERACRUZ (SLICV).

Tipos de residuos	SLICV																	
	Zona norte					Zona centro					Zona sur							
	LAG	DLC	TAR	CON	LAU	COL	DCA	UHM	ENC	ENS	ILU	VIV	D	ENR	CAR	COY	MAL	OLM
Residuos sólidos urbanos (RSU)	31.82	42.86	50	35.71	52.78	45	50	13.33	12.5	31.82	75	16.67	0	60	0	33.33	11.11	
Residuos de manejo especial (RME)	22.73	28.57	33.3	42.86	29.16	30	20	0	50	18.18	25	50	33.33	40	28.57	42.86	55.56	
Residuos peligrosos (RP)	36.36	0	0	0	0	5	0	Sin acceso	46.67	12.5	13.64	0	16.67	66.67	0	42.86	23.81	11.11
Residuos mixtos (RM)	9.09	28.57	16.67	21.43	18.06	20	30	40	25	36.36	0	16.67	0	0	28.57	0	22.22	
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Número total de fuentes puntuales identificadas (N)	22	7	6	14	72	20	10	30	16	22	4	6	3	5	7	21	9	

LAG: Laguna Lagartos; DLC: Laguna del Carmen; TAR: Laguna Tarimoya; CON: Laguna las Conchas; LAU: Laguna Laureles; COL: Laguna la Colorada; DCA: Laguna Dos Caminos; UHM: Laguna Unidad Habitacional la Marina; ENC: Laguna el Encanto; ENS: Laguna Ensueño; ILU: Laguna Ilusión; VIV: Laguna Viveros; D: Laguna D; ENR: Laguna del Encierro; CAR: Laguna Caracol; COY: Laguna Coyoil; MAL: Laguna Malibrán; OLM: Laguna Olmecca.

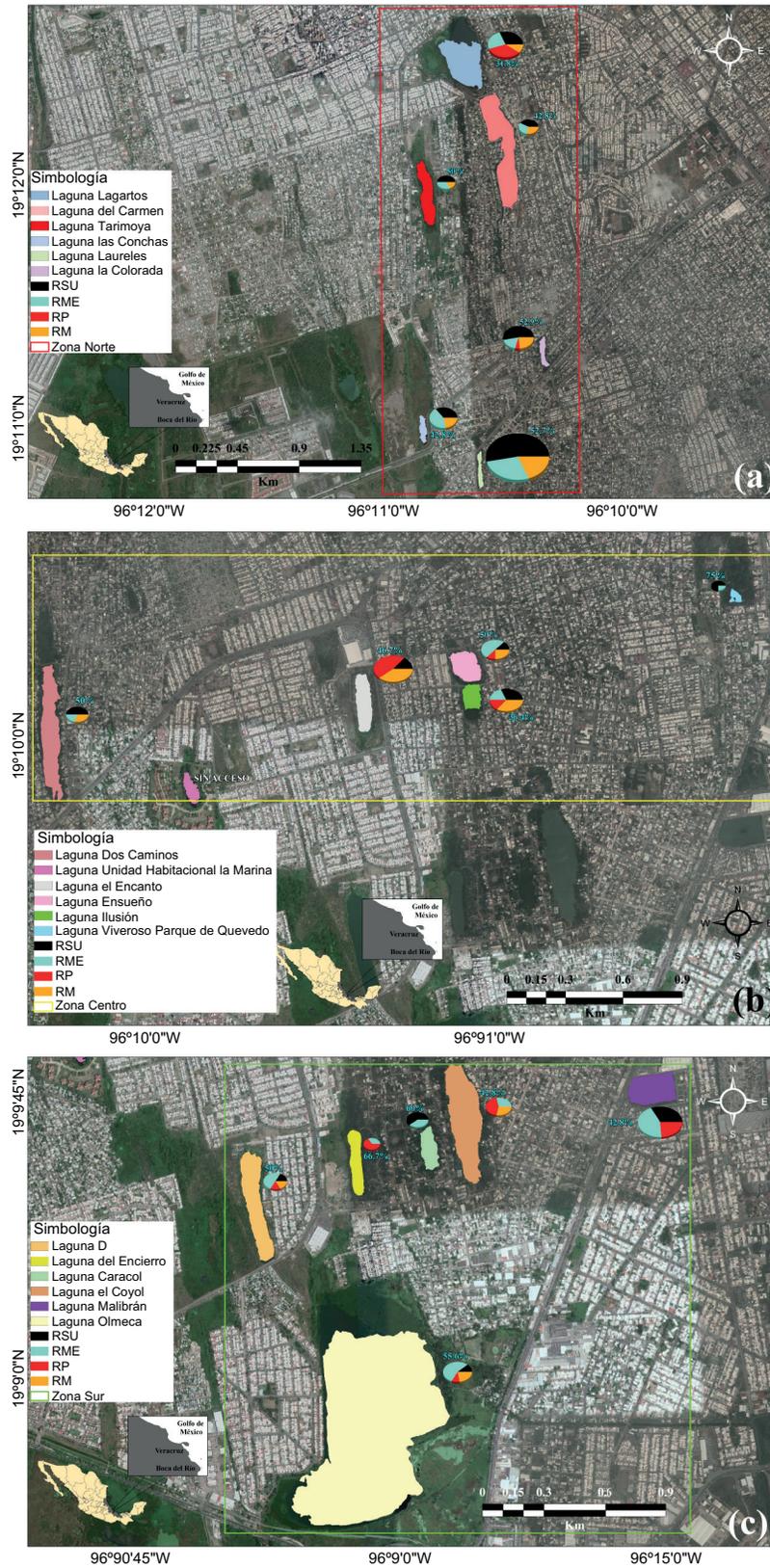


Fig. 3. Porcentaje de los tipos de residuos identificados en el Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz: (a) lagunas zona norte, (b) lagunas zona centro y (c) lagunas zona sur.

CUADRO III. GRADO DE IMPACTO DE LOS TIPOS DE RESIDUOS IDENTIFICADOS EN EL SISTEMA DE LAGUNAS INTERDUNARIAS DE LA CIUDAD DE VERACRUZ (SLICV) Y SU TENDENCIA ACTUAL^{1,2}.

Servicios ecosistémicos	SLICV																	
	Zona norte						Zona centro						Zona sur					
	LAG	DLC	TAR	CON	LAU	COL	DCA	UHM	ENC	ENS	ILU	VIV	D	ENR	CAR	COY	MAL	OLM
Provisión	Comida	↗	↘	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Agua dulce	↑	↘	↑	↑	↑	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Madera y combustible	→	↗	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Bioquímica	↗	↘	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Regulación	Clima	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Flujos hidrológicos	↗	↘	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Purificación de agua y tratamiento de residuos	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Erosión	↑	↗	↑	↑	↑	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Peligros naturales	→	↗	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Polinización	↗	→	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Culturales	Recreación	↗	↗	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Estéticos	↗	↗	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Educativos	↗	↗	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Soporte	Formación de suelos	→	↗	↗	↗	↗	↗	-	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
	Reciclaje de nutrientes	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

¹La escala de color cualitativa representa el grado de impacto de los residuos sobre el SLICV (blanco: bajo; amarillo: moderado; naranja: alto; rojo: muy alto) definido por Andrade-Hernández et al. (1999); ²las flechas representan la tendencia actual de la problemática de los residuos sobre los servicios ecosistémicos en el SLICV (tendencia nula; ↘ tendencia decreciente; → tendencia continua; ↗ tendencia creciente; ↑ tendencia alta y en aumento) definida en la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (WRI 2005). LAG: Laguna Lagartos; DLC: Laguna del Carmen; TAR: Laguna Tarimoya; CON: Laguna las Conchas; LAU: Laguna Laureles; COL: Laguna la Colorada; DCA: Laguna Dos Caminos; UHM: Laguna Unidad Habitacional la Marma; ENC: Laguna el Encanto; ENS: Laguna Ensueño; ILU: Laguna Ilusión; VIV: Laguna Viveros; D: Laguna D; ENR: Laguna del Encierro; CAR: Laguna Caracol; COY: Laguna Coyoil; MAL: Laguna Malibrán; OLM: Laguna Olmecca.

Las transformaciones y pérdidas de estos ecosistemas han tenido un fuerte impacto en la sociedad, y se ha observado una reducción de funciones clave (e.g., el mantenimiento de la biodiversidad, la mejora en la calidad del agua, la contención de inundaciones y el manejo del carbono). En el análisis cualitativo del presente trabajo se muestra una amenaza cada vez más alta (en más del 50 %) a la provisión de los servicios ecosistémicos del SLICV. Zedler y Kercher (2005) establecieron que existe desproporción entre los servicios que estos ecosistemas proporcionan y el área que cubren. A nivel mundial, las lagunas internas ocupan sólo alrededor del 3 % de la superficie terrestre (139.84 ha corresponden al SLICV); sin embargo, contribuyen hasta con el 40 % de los servicios ambientales renovables globales (De Groot et al. 2007).

La valoración de este tipo de lagunas y sus ecosistemas de humedales no se limita a los beneficios económicos y monetarios que pueden brindar a los seres humanos, sino también a su valor religioso, social, ambiental y estético (Zedler y Kercher 2005, De Groot et al. 2007). Crouzat et al. (2016) establecieron que las interacciones entre los servicios ecosistémicos deben analizarse desde la perspectiva de tres facetas implícitas: provisión, demanda y uso. Lo anterior debe hacer referencia al marco socioambiental en el que tienen sentido los servicios ecosistémicos; no obstante, se requiere el uso de diversas herramientas para identificar, caracterizar y asignar una valoración a estas relaciones.

La mayor utilidad de los sistemas de información geográfica (SIG) está íntimamente relacionada con su capacidad de representar el mundo real a partir de bases de datos digitales (Bosque-Sendra et al. 2004). El análisis espacial a partir de los SIG posee alta relevancia para la delimitación de las lagunas y la identificación y caracterización de los tipos de residuos. Velasco-Fierro et al. (2015) describieron una alta proliferación de puntos de contaminación en 13 localidades aledañas a la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, mediante un análisis geoespacial y la aplicación de encuestas. Se observa un deficiente o inexistente servicio de recolección de RSU en dichas localidades y los habitantes desechan sus RSU a la calle, generando puntos de contaminación. En tiempos de lluvia los residuos sólidos son arrastrados a la laguna por las corrientes y se infiltran en el suelo, ocasionando enfermedades y pérdidas económicas por mala imagen y deterioro ambiental.

En México existen metodologías para ubicar sitios de disposición final de RSU y RME; no obstante,

tienen restricciones y no se apegan a los criterios establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (PROFEPA 2015). El artículo 10 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (PROFEPA 2003) establece que los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de RSU, las cuales consisten en su recolección, traslado, tratamiento y disposición final. Sin embargo, la falta de asesoría técnica para la recolección eficiente y disposición final segura de residuos son las principales causas del deterioro ambiental (Pérez et al. 2002, Buenrostro e Israde 2003). Los microorganismos, al entrar en contacto con materia orgánica de los residuos y oxígeno, inician el proceso de descomposición generando malos olores, gases tóxicos y contaminación visual y del agua subterránea (Villafructe et al. 2004, Silva et al. 2006).

Los SIG son una herramienta eficaz en el análisis espacial para determinar la forma en que la contaminación influye sobre las condiciones ambientales y suscita su alerta temprana (Velasco-Fierro et al. 2015). Esto, con el fin de proponer medidas de mitigación pronta para el mejoramiento del sistema de vigilancia ambiental (Bosque-Sendra et al. 2004). El uso de SIG para la caracterización espacial de los tipos de residuos que impactan directamente al SLICV es determinante para identificar las fuentes puntuales de contaminación en cada laguna. De esta manera, la información respaldará la toma de decisiones para una correcta gestión ambiental y para evaluar impacto ambiental de los residuos sobre los servicios ecosistémicos del SLICV.

CONCLUSIONES

El trabajo generado por Sarabia-Bueno (2004) es la primera referencia para el desarrollo de una propuesta de manejo del proyecto de gestión ambiental del SLICV, con un enfoque proactivo que contara con la participación de la sociedad en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río. De esta manera se impulsaría una transformación en beneficio del sistema lagunar y la población, con el objetivo principal de consolidar un decreto para que este sistema fuera un área natural protegida y sitio Ramsar (Ramsar 2004). La presente investigación tuvo como objetivo identificar y caracterizar el impacto de los diferentes tipos de residuos a partir de un enfoque espacial, y analizar cualitativamente el impacto y la tendencia actual de la pérdida de servicios ecosistémicos del SLICV. Landgrave y

Moreno-Casasola (2012) establecieron que existen limitaciones debidas a la falta de instrumentos y datos disponibles. Sin embargo, consideramos que este trabajo aporta información para la toma de decisiones y la priorización de acciones en la materia.

El análisis espacial es una herramienta importante para la caracterización de residuos en el SLICV. Los resultados pueden motivar a la comunidad científica a considerar su relevancia como herramienta de análisis para evaluación del manejo, restauración y conservación de estos humedales. De esta manera se podría dimensionar la problemática y sentar las bases de los programas de conservación y restauración necesarios para garantizar la permanencia de ecosistemas y sus servicios ambientales. Es necesario contar con políticas ambientales realistas que consideren las áreas de mayor afectación y valoren la producción de las actividades económicas de este tipo de lagunas vs. los servicios ecosistémicos mayormente impactados, y así disponer de un plan de manejo sustentable para este sistema natural (Moreno-Casasola 2008).

El impacto de los diferentes residuos sobre los servicios ecosistémicos que provee el SLICV permitió conocer el estado actual del sector ambiental, proponiendo una nueva clasificación de tipo de desechos denominados residuos mixtos (RM). El manejo de los residuos produce grandes impactos ambientales en los sistemas ecosistémicos de estos humedales, y deben ser controlados para minimizar su efecto. La problemática fundamental de estos residuos es su volumen, el cual no fue el tema de esta investigación. En este sentido, esta investigación provee elementos sustanciales como un instrumento preventivo preliminar para futuros estudios de investigación en este tipo de ecosistema. Esto no sólo crea conciencia sobre la vulnerabilidad ambiental de las zonas afectadas, sino que también permitirá a los encargados de la toma de decisiones implementar actividades integrales para la preservación del SLICV en la formulación, ejecución y elaboración de un plan de manejo de residuos. Así, la población afectada y autoridades correspondientes podrán tomar las medidas pertinentes de prevención para el mejoramiento de las condiciones ambientales de este importante ecosistema en Veracruz.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca No. 474821 otorgada a la segunda autora de este trabajo para cursar la maestría en ciencias en Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Boca del Río.

REFERENCIAS

- Andrade-Hernández M., Morales-Abril G. y Hernández-Yáñez A. (1999). Guía de análisis de impactos y sus fuentes en áreas naturales. 1a ed. The Nature Conservancy, Miami, EUA, 45 pp.
- Bello-Pineda J. y Gómez L. (2009). Humedales: definición, servicios ambientales y amenazas. En: Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México, vol.1 (Buenfil Friedman J., Ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, México, pp. 54-65.
- Bosque-Sendra J., Díaz-Castillo C., Díaz Muñoz M.A., Gómez Delgado M., González Ferreiro D., Rodríguez Espinosa V.M. y Salado García M.J. (2004). Propuesta metodológica para caracterizar las áreas expuestas a riesgos tecnológicos mediante SIG. Aplicación en la comunidad de Madrid. *GeoFocus* 4, 44-78.
- Buenrostro O. e Israde I. (2003). La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del Lago de Cuitzeo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 19 (4), 161-169.
- Chong-Garduño M.C. (2019). La vulnerabilidad de las áreas urbanas y de las áreas naturales en la periferia de la zona conurbada de Veracruz. *Anuario de Espacios Urbanos, Historia, Cultura y Diseño* 26, 109-140.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P. y van den Belt M. (1998). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics* 25 (1), 253-260. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00020-2)
- Crouzat E., Martín-López B., Turkelboom F. y Lavorel S. (2016). Disentangling trade-offs and synergies around ecosystem services with the influence network framework: Illustration from a consultative process over the French Alps. *Ecology and Society* 21 (2), 1-18. <https://doi.org/10.5751/ES-08494-210232>
- De Groot R.S., Stuij M.A.M., Finlayson C.M. y Davidson N. (2007). Valoración de humedales: lineamientos para valorar los beneficios derivados de los servicios de los ecosistemas de humedales. Informe Técnico de Ramsar núm. 3 [en línea]. <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-27-es.pdf> 04/05/2021
- ESRI (2015). ArcMap v. 10.3 [en línea]. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/19/04/2021>
- Fotheringham A., Brunson C. y Charlton M. (2000). *Quantitative geography: Perspectives on Spatial Data Analysis*. 1st ed. Sage Publications, Londres, Inglaterra, 272 pp.
- GE (2020). Google Earth Web [en línea]. <https://earth.google.com/web/@19.16908207,-96.15307658,24.72273014a,22553.24749252d,35y,0h,0t,0r> 18/12/2020

- GE Pro (2020). Google Earth Pro v. 7.3.3.7786 [en línea]. <https://www.google.com/intl/es/earth/versions/18/12/2020>
- GM (2020). Google maps [en línea]. <https://www.google.com.mx/maps/@19.1746811,-96.1453783,8206m/data=!3m1!1e3> 18/12/2020
- Junk W.J. (2002). Long-term environmental trends and the future of tropical wetlands. *Environmental Conservation* 29 (4), 414-435. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000310>
- Landgrave R. y Moreno-Casasola P. (2012). Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación Ambiental. Ciencia y Política Pública* 4 (1), 19-35.
- Llorente-Bousquets J. y Ocegueda S. (2008). Estado del conocimiento de la biota. En: *Capital natural de México: conocimiento actual de la biodiversidad*, vol. 1 (Soberón J., Halffter G. y Llorente-Bousquets J., Eds.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ciudad de México, México, pp. 283-322.
- López-Ortiz J. (2015). Mitigación de impacto antrópico mediante estrategias de diseño: el caso del sistema lagunar interdunario asociado a la costa. *Memorias. II Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes*. Sevilla, España, pp. 1143-1154.
- Mitsch W.J. y Gosselink J.G. (2000). The value of wetlands: Importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics* 35 (1), 25-33. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00165-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00165-8)
- Monroy-Ibarra R. y Travieso-Bello A. (2006). Herramientas técnicas para la planificación costera: mapas, bases de datos y sistemas de información geográfica. En: *Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal* (Moreno-Casasola P., Peresbarbosa E. y Travieso-Bello A., Eds.). Gobierno del Estado de Veracruz e Instituto de Ecología, Xalapa, México, pp. 659-680.
- Moreno-Casasola P. (2008). Los humedales en México: tendencias y oportunidades. *Cuadernos de Biodiversidad* 28, 10-18. <https://doi.org/10.14198/cdbio.2008.28.02>
- Paredes-Lizama D.E. (2019). Caracterización de residuos y su impacto en el Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz implementando el análisis espacial. Tesis de Maestría. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, Veracruz, México, 84 pp.
- Pérez L.M., Vicencio de la Rosa M.G., Alarcón Herrera M.T. y Vaca Mier M. (2002). Influencia del basurero municipal en la calidad del agua de acuífero de la ciudad de Durango, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 18 (3), 111-116.
- PROFEPA (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, México, 8 de octubre (última reforma publicada el 18 de enero de 2021).
- PROFEPA (2006). Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, México, 30 de noviembre (última reforma publicada el 31 de octubre de 2014).
- PROFEPA (2015). Proyecto de modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, México, 4 de agosto.
- Ramsar (2004). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz [en línea]. <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1336RIS.pdf> 10/12/2020
- Ramsar (2021). The list of wetlands of international importance. International importance of the convention on wetlands [en línea]. <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/sitelist.pdf> 13/12/2021
- Rodríguez-Luna E., Gómez-Pompa A., López-Acosta J.C., Velázquez-Rosas N., Aguilar-Domínguez Y. y Vázquez-Torres M. (2011). Sitio Ramsar 1450. Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz. En: *Atlas de los espacios naturales protegidos de Veracruz* (Palafox-López N. y Arias-Leal I., Eds.). Secretaría de Educación del Estado de Veracruz, Xalapa, México, pp. 219-227.
- Rodríguez-Zúñiga M.T., Troche-Souza C., Vázquez-Lule A.D., Márquez-Mendoza J.D., Vázquez-Balderas B., Valderrama-Landeros L., Velázquez-Salazar S., Cruz-López M.I., Ressler R., Uribe-Martínez A., Cerdeira-Estrada S., Acosta-Velázquez J., Díaz-Gallegos J., Jiménez-Rosenberg R., Fueyo-Mac Donald L. y Galindo-Leal C. (2013). *Manglares de México/ extensión, distribución y monitoreo*. 1a ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ciudad de México, México, 130 pp.
- RSIS (2020). Sistema de Lagunas Interdunarias de la Ciudad de Veracruz. Ramsar Sites Information Service. [en línea]. <https://rsis.ramsar.org/ris/1450> 10/12/2020
- Sarabia-Bueno C.C. (2004). Sistema Lagunar de la Ciudad de Veracruz, México: propuesta de manejo bajo la visión de proyectación y gestión ambiental. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. Veracruz, México, 325 pp.

- SAS (2020). SAS Planet Release v. 191221 [en línea]. https://bitbucket.org/sas_team/sas.planet.bin/downloads/19/12/2020
- Silva T.J., Estrada F., Ochoa S. y Cruz G. (2006). Propuesta metodológica para la ubicación de áreas de disposición de residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 22 (4), 147-156.
- Travieso-Bello A. y Moreno-Casasola P. (2006). Los humedales. En: *Entornos veracruzanos: la costa de La Mancha* (Moreno-Casasola P., Ed.). Instituto de Ecología, Xalapa, México, pp. 231-246.
- Velasco-Fierro G., Torres-Espino G. y González-González J. (2015). Análisis ambiental por contaminación en trece localidades aledañas a la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero. *Memorias. 20º Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México*, Cuernavaca, México, pp. 1-22.
- Villafuerte S.I., Flores O.D., Guadalupe G.E. y Zea A.M. (2004). Evaluación ambiental del relleno sanitario para el santuario histórico de Machu Picchu y pueblos aledaños. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas* 7 (14), 54-63. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v7i14.732>
- WRI (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis*. 1a ed. Millennium Ecosystem Assessment. World Resources Institute. Washington, EUA, 80 pp.
- Zedler J.B. y Kercher S. (2005). Wetland resources: Status, trends, ecosystem services and restorability. *Annual Review of Environment and Resources* 30, 39-74. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>