

Desarrollo de indicadores ambientales e índice de calidad de lagos someros pampeanos de Argentina con alta intervención antrópica

• Asunción Romanelli* • Héctor Enrique Massone •
Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina

*Autor para correspondencia

Resumen

Romanelli, A., & Massone, H. E. (noviembre-diciembre, 2016). Desarrollo de indicadores ambientales e índice de calidad de lagos someros pampeanos de Argentina con alta intervención antrópica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(6), 123-137.

Este trabajo presenta un procedimiento para evaluar la sostenibilidad en aguas continentales con base en una serie de indicadores e índices que reflejan la calidad ambiental. A la hora de abordar la calidad, se tuvieron en cuenta tres dimensiones de la misma: estructura y componentes del medio biofísico, funciones ecosistémicas e interacciones sociedad-medio. Las funciones se consideran desde los puntos de vista "ecocéntrico" (naturalidad) y "antropocéntrico" (fuente, sumidero, y soporte). Las interacciones humanas con el medio están representadas por indicadores de presión, estado y respuesta. Los componentes ambientales incluyen agua, biota, suelo, uso del suelo y características sociales. Aumentos o disminuciones en los valores del índice indican tendencias hacia una mayor o menor sostenibilidad del sistema. Además, se explica el marco metodológico, indicadores y criterios utilizados. Se presentan y discuten los resultados obtenidos para dos lagunas de la pampa argentina.

Palabras clave: indicadores ambientales, calidad ambiental, cuerpos de agua continentales, pampa argentina.

Abstract

Romanelli, A., & Massone, H. E. (November-December, 2016). *Environmental Indicators and Quality Index Development in Pampean Shallow Lakes (Argentina) under Anthropogenic Impact*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(6), 123-137.

This contribution presents a procedure for sustainability assessment in inland waters, based on a series of indicators and indices that reflect environmental quality. Three dimensions of environmental quality are taken into account: functions, interactions and components. Functions are considered from the "ecocentric" (naturalness) and "anthropocentric" (source of resources, sink for wastes, support of activities and provider of services) points of view. Human-environment interactions are represented by means of pressure, state and response indicators. Environmental components include water, biota, soil, land use, and social characteristics. Increases or decreases in index values are assumed to indicate trends towards greater or lesser sustainability of existing practices. The methodological framework, indicators and criteria used for the assessment are explained. Results obtained on two shallow lakes of the Pampa region (Argentina) as a case study are presented and discussed.

Keywords: Environmental indicators, environmental quality, inland water bodies, Pampa Argentina.

Recibido: 17/03/2015

Aceptado: 02/05/2016

Introducción

Según la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, 1993), un indicador es un parámetro o valor derivado de otros parámetros dirigido a proveer información y describir el estado de un fenómeno, con un

significado añadido mayor que el directamente asociado con su propio valor. Constituye una variable que refleja de forma sintética una preocupación social con respecto al medio, con el fin de insertarla coherentemente en el proceso de toma de decisiones. Los indicadores ambientales representan un instrumento de gran utilidad para

organizar, sistematizar, cuantificar, simplificar y comunicar información relativa a distintos aspectos del medio, que resulta básica para la toma de decisiones en el marco de la gestión ambiental (OECD, 1993; Cendrero, 1997).

Los indicadores pueden, a su vez, combinarse para obtener índices agregados, que reflejan cualidades complejas del medio y proporcionan criterios para evaluar la sustentabilidad de políticas, planes y actuaciones que afecten a los recursos naturales (Gouzee, Mazijn, & Billharz, 1995; Cendrero, 1997; Cendrero *et al.*, 2003). Poder generar indicadores que muestren las funciones ecosistémicas conocidas como fuente (de recursos), soporte (de actividades/provisión de servicios), sumidero (de efluentes de distinto tipo) y naturalidad (ausencia de modificaciones introducidas por el hombre) (Cendrero *et al.*, 2003) es un paso importante e imprescindible para el diseño de un índice de calidad ambiental, que sea de utilidad para el seguimiento de dichas funciones y para orientar el manejo del recurso de manera sustentable.

La producción de información para la toma de decisiones implica el conocimiento de qué y cómo se debe medir y monitorear. Para esto es necesaria la definición de un marco de referencia que permita organizar la información en función de las prioridades y los usuarios. Existen varios marcos conceptuales disponibles que pueden utilizarse para guiar la selección, desarrollo y uso de indicadores. Los modelos existentes para obtener, analizar y elaborar información ambiental son por lo general de dos tipos: 1. Modelos para la elaboración y aplicación de estrategias que definen la relación entre la información ambiental y los valores sociales y/o objetivos y metas políticos (EPA, 1994); y 2. Modelos para el monitoreo de los procesos ambientales y las interacciones sociedad-naturaleza, que tratan de clasificar los problemas ambientales en términos de causa-efecto (UN, 1984). Estos dos tipos de modelos son complementarios, pues se refieren a diferentes dimensiones del proceso de elaboración de información ambiental para la toma de decisiones. No obstante, parece más acertada la definición de un marco metodológico del segun-

do tipo, que ayude al monitoreo del estado del medio, así como al seguimiento de las acciones y estrategias en vías de una planificación y gestión ambiental.

Existen numerosos modelos conceptuales de tipo causa-efecto en el contexto de la evaluación ambiental basada en indicadores: los modelos presión-estado-respuesta (PER), fuerza motriz-estado-respuesta (DSR) y fuerza motriz-presión-estado-impacto-respuesta (DPSIR) (Hammond, Adriaanse, Rodenburg, Bryant & Woodward, 1995; OECD, 2001). Un modelo ampliamente utilizado para la aplicación de indicadores ambientales es el PER (OECD, 1991, 1993). Este marco conceptual es probablemente uno de los más utilizados en el mundo debido a su simpleza, facilidad de uso y posibilidad de aplicación a diferentes niveles, escalas y actividades humanas (CEPE, 2007). Obedece a una lógica, según la cual, las actividades humanas ejercen presiones sobre diversos atributos del medio biofísico (estado), alterándolos en mayor o menor medida. La sociedad en su conjunto identifica estas variaciones y puede decidir (objetivos de política) la adopción de medidas (respuestas) que tratarían de corregir o prevenir las tendencias negativas detectadas. Estas medidas se dirigen con carácter cautelar contra los mismos mecanismos de presión, o bien, con carácter corrector, directamente sobre los factores afectados del medio (Niemeijer & De Groot, 2008a, 2008b). Pueden ser elaboradas y aplicadas a nivel de los gobiernos, del sector privado, de las cooperativas u organizaciones de base o individualmente, y tener un marco legal nacional o internacional basado en objetivos y metas de desarrollo, y/o gestión ambiental. Este modelo conceptual de indicadores ha sido mencionado por varios autores en sus trabajos (Cendrero *et al.*, 2003; Alcaide-Orpí *et al.*, 2006; Niemeijer & De Groot, 2008a, 2008b).

La sucesión de periodos climáticos secos y húmedos en la llanura pampeana, en el marco de la geomorfología de la región, condujo a un importante desarrollo de sistemas de humedales y lagos someros (lagunas) (Iriondo & Kröhling, 2007), que desempeñan un papel importante

en el ciclo hidrológico global de la Provincia de Buenos Aires (Fernández-Cirelli & Miretzky, 2002). Además, proporcionan importantes servicios ambientales, como el ciclado de nutrientes, la regulación del clima a nivel local y regional, regulación de flujos hidrológicos, provisión de hábitat, y oportunidades educativas y recreativas, entre otros (MA, 2005). Las actuales problemáticas que enfrentan estos ecosistemas, como el aumento del nivel de polución de sus aguas, cambios en el uso del suelo de sus cuencas de drenaje y aumento del nivel de eutrofia, entre otras, han obligado a los investigadores a ir más allá de las descripciones de sus comunidades y parámetros fisicoquímicos, haciéndose necesario un enfoque interdisciplinario de los mismos (Whited, 2000; Quirós, Rennella, Boveri, Rosso, & Sosnovsky, 2002; Oliveira & Cortes, 2006).

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de indicadores para evaluar la calidad ambiental de cuerpos lénticos sometidos a usos múltiples, utilizando como caso de estudio dos lagunas de la región pampeana, Argentina. Para ello, se eligió como marco conceptual al modelo presión-estado-respuesta (PER), que se basa en elaborar tres grupos de indicadores. El primero, para observar las causas de los problemas ambientales, consecuencia de la influencia de la sociedad sobre la naturaleza (indicador de presión); el segundo se relaciona con la calidad del medio, resultado de las acciones humanas (indicador de estado), y el tercero se refiere a las medidas que toma la sociedad para evitar/minimizar el deterioro del sistema en términos de calidad ambiental (indicador de respuesta).

El monitoreo, así como la obtención y elaboración de datos y estadísticas son parte fundamental del proceso de elaboración de información útil para la toma de decisiones (Hammond *et al.*, 1995). Esta parte del proceso permitirá la identificación de problemas y áreas prioritarias que ayuden a la formulación de políticas generales. El desarrollo de indicadores e índices, que se basan en información derivada del monitoreo, ayudará a la implementación y aplicación de las acciones y estrategias, así como al seguimiento continuo de las mismas.

Área de estudio

Para este estudio se seleccionaron dos lagunas del sudeste bonaerense situadas en el sistema serrano de Tandilia: La Brava y de Los Padres (figura 1), cuerpos de agua someros y de régimen permanente. Poseen una superficie de 400 y 216 ha, y una profundidad máxima de 1.24 y 4.57 m, respectivamente (Romanelli, Quiroz-Londoño, Massone, Martínez, & Bocanegra, 2010). Ambas reciben un único afluente, formado por la conjunción de tributarios en el sector alto de su respectiva cuenca y drenan parte de sus aguas superficialmente a través de otro arroyo. Además, reciben aporte directo de las aguas subterráneas, pues el modelo hidrogeológico conceptual planteado para estos humedales establece una relación efluente-influente con el acuífero (Romanelli *et al.*, 2010).

Contexto de la problemática ambiental

Los humedales son ecosistemas cuya funcionalidad aporta, sin duda, bienes y servicios de interés tanto ecológico como económico y social (MA, 2005). Sin embargo, presentan un equilibrio muy frágil y, además, muestran una elevada sensibilidad y vulnerabilidad, pues los impactos a los que son sometidos no son siempre evidentes ni reversibles (Grosman, 2008). En particular, los humedales ligados con la dinámica hídrica subterránea, como es el caso de las lagunas en estudio, muestran asimismo, una debilidad añadida, al estar ligados a la evolución de los niveles piezométricos, dependientes a su vez de la correcta gestión de la explotación de los acuíferos (Aguilera, Moreno, Castaño, Jiménez, & De la Losa).

Las lagunas pampeanas, como las lagunas La Brava y de Los Padres, disponen de abundante materia orgánica y elevadas concentraciones de nutrientes, que determinan un nivel de eutrofia avanzado desde su origen. La expansión de la actividad agropecuaria de sus cuencas de drenaje, la tecnificación, urbanización y el aumento de desechos de diferente origen (p. ej., efluentes cloacales o industriales), entre otros, han

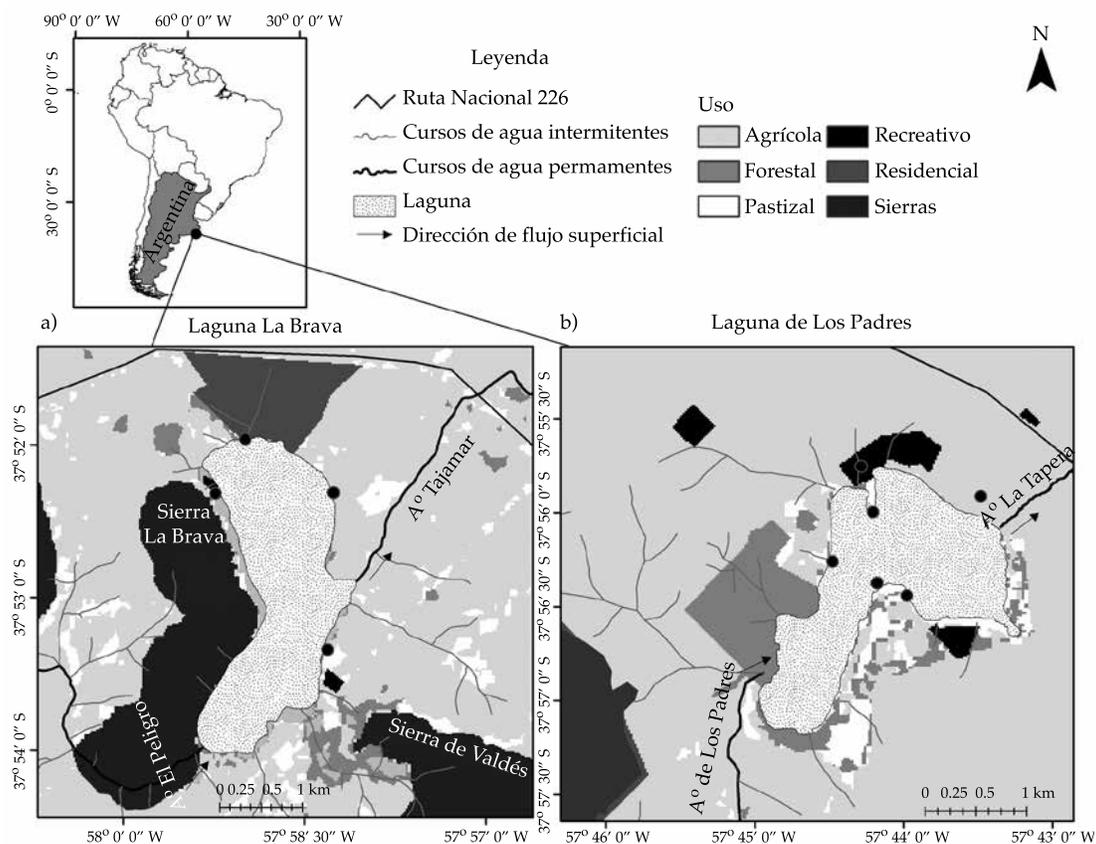


Figura 1. Mapa de localización de las lagunas estudiadas y usos del suelo.

generado un impacto negativo sobre la calidad de sus aguas, en perjuicio de sus usos actuales o potenciales. La aceleración de los procesos de eutrofización atenta contra la conservación de este tipo de ambientes (Grosman, 2008).

La laguna La Brava, localizada en un área netamente agrícola, es considerada un importante centro de recreación, y constituye un área útil para la divulgación y educación de la naturaleza. A su alrededor se localizan diversos establecimientos recreativos y turísticos. En su sector norte se ha desarrollado una zona residencial que experimenta un marcado incremento poblacional, existiendo actualmente 115 habitantes permanentes sin servicio de agua corriente ni cloacas; en temporada veraniega, esta cantidad se ve duplicada. La laguna de Los Padres se encuentra inmersa en el cinturón hortícola de la ciudad de Mar del Plata dedicado

especialmente a la producción de hortalizas, frutillas y plantas ornamentales. Además, cercano a este humedal, se ubica el barrio residencial Sierra de Los Padres, que desde la última década viene experimentando un marcado incremento poblacional. Actualmente, 1 672 personas residen ahí de forma permanente. En el perímetro de este cuerpo de agua existe infraestructura vinculada con clubes de pesca, recreos y restaurantes. Existe una constante afluencia de visitantes a estos cuerpos de agua, en especial de las ciudades de Mar del Plata y Balcarce. Todo lo mencionado genera una consecuente presión sobre ambos sistemas acuáticos (Romanelli *et al.*, 2010) (figura 1).

A pesar de las distintas actividades humanas que se desarrollan en las cuencas de drenaje de las dos lagunas, éstas conservan su potencial de proveedoras de servicios ambientales. En

particular, los servicios de naturalidad y soporte, todavía en un estado de conservación aceptable, hacen que sea un momento ideal para la generación de una figura legal de protección. Es por este motivo que disponer de un índice de calidad ambiental en cuerpos de agua dulce proveerá una herramienta de suma utilidad para la toma de decisión en tales sistemas acuáticos.

Metodología

Para la elaboración de un sistema de indicadores ambientales como herramienta útil de gestión de lagunas bajo usos múltiples se siguieron básicamente cuatro etapas: 1) identificación y definición de los problemas y áreas prioritarias para las cuales se deben elaborar los indicadores; 2) observación y análisis de la calidad y disponibilidad de datos (parámetros a medir) para el desarrollo y uso de los indicadores; 3) selección de un conjunto de indicadores con base en una serie de criterios de selección; y 4) aplicación del sistema de indicadores en el estudio de caso.

La identificación de los principales problemas ambientales en el área se realizó a través de encuestas semiestructuradas a los distintos actores sociales, con el objetivo de poder definir los parámetros que permitan medir hasta qué punto el sistema ha sido o es afectado (Romanelli, Massone, & Escalante, 2011). La encuesta consistió en la formulación de preguntas que fueron organizadas en un cuestionario estandarizado, utilizando de preferencia preguntas de tipo cerradas y alguna pregunta abierta para indagar sobre aspectos muy puntuales. En las primeras, el encuestado debió seleccionar de una serie preasignada de categorías la respuesta que mejor se aproximaba a su opinión; mientras que en el segundo caso respondió con sus propias palabras. Se llevaron a cabo un total de 79 y 55 encuestas en las cuencas de las lagunas La Brava y de Los Padres, respectivamente.

Se recolectó y analizó la calidad y disponibilidad de datos para el desarrollo y uso de los indicadores seleccionados; además, se consideró una serie de criterios de selección en función de las características del territorio analizado,

la confiabilidad de los datos, la relación con los problemas y prioridades en la unidad de análisis, y la utilidad para el usuario.

A la hora de abordar la calidad ambiental se tuvieron en cuenta tres dimensiones de la misma (Cendrero *et al.*, 2003): a) funciones ecosistémicas, b) interacciones sociedad-medio natural y c) componentes del medio. En la primera dimensión se consideraron dos perspectivas de la calidad ambiental: una de tipo ecocéntrico y otra de tipo antropocéntrico. Desde el punto de vista ecocéntrico, se propone que la calidad ambiental es proporcional al grado de naturalidad del área que se analiza; esto es, cuanto menor sea el grado de modificación de las características naturales del medio mayor será su calidad. La óptica antropocéntrica incluye la consideración de las principales funciones que el medio físico desempeña en relación con los seres humanos: fuente de recursos, sumidero de residuos, soporte de actividades y proveedor de servicios (SCOPE, 1995). Cabe aclarar que la función fuente de recursos hace referencia a aquellas actividades extractivas (p. ej., pesca); mientras que la función soporte se vincula con la provisión de servicios recreativos y residuales. Para definir los distintos tipos de interacciones sociedad-medio se utilizó el modelo PER, como ya se mencionó (figura 2). Finalmente, el medio puede ser considerado como una superposición de diferentes componentes físicos y sus relaciones. Estos componentes incluyen suelo, agua, clima y elementos humanos, entre otros.

Después de la selección del conjunto de indicadores, según el modelo descrito, se procedió a asignar a cada uno de los indicadores un valor; para ello se ha recurrido a la consulta de diversas fuentes bibliográficas. Se incluyeron datos estadísticos poblacionales del municipio y la nación; cartografía e imágenes satelitales de la zona; normas nacionales e internacionales; información aportada y actualizada de los diferentes organismos e instituciones del territorio; resultados de análisis de laboratorio, y trabajos de diversa índole relacionados con la temática (Custodio & Llamas, 1976; WHO, 1982; Appelo & Postma, 1993; Bain & Stevenson, 1999; Quirós

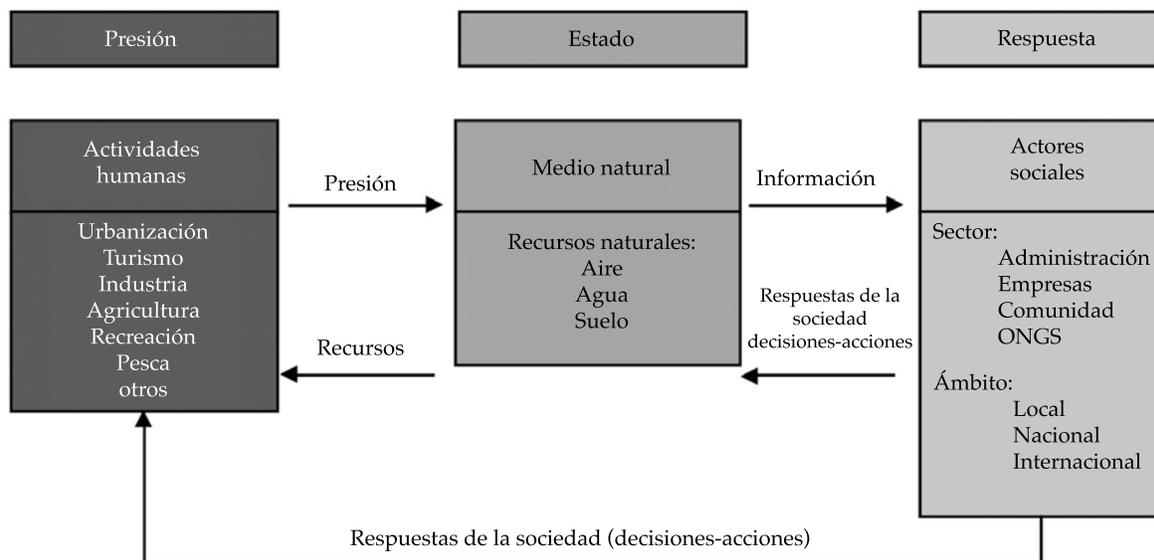


Figura 2. Modelo presión-estado-respuesta (PER).

et al., 2002; Fernández-Cirelli & Miretzky, 2002, 2004; INDEC, 2012).

Previo a la estimación de los distintos índices por función ecosistémica, se clasificó cada indicador en cinco categorías a partir de las fuentes bibliográficas ya citadas. Cada categoría cualitativa se asoció con un valor de 1 a 5, para después poder normalizar la información, eliminando así el efecto del tamaño de la unidad de medición, siendo 1 igual a muy bueno; 2, bueno; 3, moderado; 4, malo, y 5 muy malo. Una vez realizada la normalización de cada indicador se calcularon los distintos índices, siguiendo el procedimiento propuesto por Cendrero *et al.* (2003), que consta de tres pasos:

- a) Cálculo de los índices de presión, estado y respuesta, para cada una de las cuatro funciones citadas, utilizando la expresión:

$$IN_p = \sum_{i=1}^n V_i \times W_i \quad (1)$$

Siendo IN_p el índice de presión sobre la naturalidad; V_i , los valores de los indicadores de

presión; W_i , el peso del indicador; n , el número total de indicadores de presión; y $\sum W_i = 1$.

De forma similar se procede para el cálculo de los índices de estado y de respuesta tanto para naturalidad como para las funciones fuente, sumidero, soporte-servicios.

- b) Los índices de presión, estado y respuesta se integran en índices de cada una de las funciones:

$$IN = (IN_p + IN_e + IN_r) / 3 \quad (2)$$

Siendo IN el índice de la función naturalidad; IN_p , el índice de presión sobre la naturalidad; IN_e , índice de estado sobre la naturalidad, e IN_r el índice de respuesta sobre la naturalidad.

Procediéndose igualmente para cada una de las funciones abordadas: IF : índice de la función fuente de recursos; IS : índice de la función sumidero de residuos; ISS : índice de la función soporte-servicio.

- c) Finalmente se calcula el índice de calidad ambiental (ICA), que es el resultado de la

agregación de los índices de las funciones de naturalidad, fuente de recursos, sumidero de residuos y soporte/servicios. La expresión utilizada es la siguiente:

$$ICA = (IN + IF + IS + ISS) / 4 \quad (3)$$

Siendo *IN* el índice de naturalidad; *IF*, el índice de fuente de recursos; *IS*, el índice de sumidero de residuos, e *ISS* el índice de soporte/servicios.

La interpretación del valor final del índice de calidad ambiental, expresado en una escala cuyo valor máximo será cinco y el mínimo uno, se hace considerando que los valores más altos corresponden a la situación ambiental más negativa. Para simplificar la valoración, se efectuó una clasificación dividida en cinco clases, donde la clase I incluye valores de 1.0 - < 1.8, con calidad ambiental muy alta; la clase II varía de ≥ 1.8 - < 2.6, indicando una calidad ambiental alta; la clase III, con valores de ≥ 2.6 - < 3.4, con moderada calidad ambiental; la clase IV, ≥ 3.4 - 4.2, con calidad ambiental mala; y la clase V, con valores de ≥ 4.2 - 5, con calidad ambiental muy mala.

Esta clasificación de los resultados puede ser usada de referencia para hacer cualquier valoración por separado de los índices de las funciones de naturalidad, de fuente de recursos, de sumidero de residuos, y de soporte de actividades y servicios, y puede ser utilizada para interpretar los valores de los índices calculados para los indicadores de presión, estado y respuesta.

Identificación y definición de los problemas ambientales para elaborar los indicadores

Los principales problemas ambientales mencionados por los actores en el área de la laguna La Brava, a través de las encuestas, son los siguientes: contaminación por uso de agroquímicos; falta de monitoreo de los recursos hídricos; falta de una regulación local clara relacionada con los usos autorizados en la cuenca del humedal, así como la ausencia de una figura jurídica que los

controle. La mayoría de los actores considera que el uso de motores de inyección de combustible en embarcaciones y deportes náuticos (48%), la contaminación del agua de la laguna debido a los agroquímicos (13%), desechos líquidos y sólidos (20%) y el sistema de cloacas (6%) son los principales factores de degradación del ecosistema acuático.

A su vez, los principales problemas ambientales mencionados por los actores involucrados en el área de la laguna de Los Padres son desechos y/o daños de los turistas (44%); caza y pesca furtiva (25%); contaminación por uso de agroquímicos (16%); tala indiscriminada, e incendios (12%). Además, se menciona una baja efectividad de control del uso del espacio natural tanto para fines turísticos como recreativos, y la ausencia de mantenimiento y limpieza del lugar.

Selección y aplicación de indicadores ambientales e índices de calidad ambiental

Los indicadores seleccionados y después determinados según la metodología expuesta son agrupados y presentados para cada una de las funciones del medio (cuadro 1). En total se eligió un set de 20 indicadores PER.

La clasificación de cada indicador en categorías para las distintas funciones ecosistémicas y su reclasificación se visualizan en los cuadros 2, 3, 4 y 5. Si bien se han asignado rangos para cada indicador, es recomendable que cada usuario ajuste su rango de valores para cada parámetro, en función de las características de su área de estudio específica.

En este trabajo se tomó como unidad de análisis la cuenca de drenaje de cada una de las lagunas en estudio. Los ICA calculados muestran que las lagunas La Brava (2.88) y de Los Padres (2.96) (cuadro 6) poseen una calidad ambiental moderada, perteneciendo a la clase III (≥ 2.6 - < 3.4). Los índices de cada función ecosistémica se visualizan en la figura 3. Sus valores varían de 1 a 5, representando la mejor y peor condición, respectivamente. Los valores de los índices de las funciones fueron peores en todos los casos en la laguna de Los Padres, en

Cuadro 1. Lista de indicadores PER seleccionados para cada función ecosistémica.

Función	Interacción	Indicador
Naturalidad	Presión	Superficie construida en línea de costa (%)
		Densidad de las vías de comunicación (km/km ²)
	Estado	Cobertura natural-pastizales (%)
		Cobertura de vegetación acuática emergente (% área laguna)
Respuesta	Territorio protegido (%)	
Fuente	Presión	Superficie cultivada (%)
		Instalaciones recreativas/turísticas (#)
		Número de botes por fin de semana
	Estado	Desarrollo de línea de costa
		Masa forestal (%)
	Respuesta	Frecuencia de monitoreo
Sumidero	Presión	Superficie de uso residencial (%)
	Estado	NO ₃ laguna (mg/l)
		Conductividad eléctrica (CE, mS/cm)
		Oxígeno disuelto (OD, mg/l)
		Demanda biológica de oxígeno (DBO ₅ , mg/l)
Respuesta	Autoridad de control	
Soporte	Presión	Densidad poblacional en área de influencia (hab/km ²)
	Estado	Profundidad de columna de agua/profundidad de zona fótica (Z _p /Z _r)
	Respuesta	Usos restringidos / controlados

Cuadro 2. Rangos para cada categoría y valor asignado en la reclasificación de los indicadores PER para la función naturalidad.

Función naturalidad		
Presión		
Valor/categoría	Superficie construida en línea de costa (%)	Densidad de vías comunicación (km/km ²)
1. Muy bueno	< 10	0
2. Bueno	≥ 10 -< 30	> 0 -< 0.5
3. Moderado	≥ 30 -< 50	≥ 0.5 -< 1.5
4. Malo	≥ 50 -< 70	≥ 1.5 -< 3.0
5. Muy malo	≥ 70	≥ 3.0
Estado		
Valor/categoría	Cobertura natural-pastizales (%)	Cobertura vegetación acuática (% área laguna)
1. Muy bueno	> 80	> 30 -< 50
2. Bueno	≤ 80 -> 60	≤ 30 -> 20
3. Moderado	≤ 60 -> 30	≤ 20 -> 10
4. Malo	≤ 30 -> 10	≥ 50 -< 70
5. Muy malo	≤ 10	≤ 10 o ≥ 70
Respuesta		
Valor/categoría	Territorio protegido (%)	
1. Muy bueno	≥ 70	
2. Bueno	< 70 -> 50	
3. Moderado	≤ 50 -> 30	
4. Malo	≤ 30 -> 10	
5. Muy malo	≤ 10	

Cuadro 3. Rangos para cada categoría y valor asignado en la reclasificación de los indicadores PER para la función fuente.

Función fuente			
Presión			
Valor/categoría	Superficie cultivada (%)	Instalaciones recreativas/ turísticas (#)	Número de botes en fin de semana
1. Muy bueno	< 10	0-3	< 30
2. Bueno	10-30	3-5	30-50
3. Moderado	30-60	5-7	50-100
4. Malo	60-80	7-11	100-200
5. Muy malo	≥ 80	> 11	≥ 200
Estado			
Valor/categoría	Desarrollo línea de costa		Masa forestal (%)
1. Muy bueno	> 1.6		≥ 30
2. Bueno	≤ 1.6 -> 1.4		20-30
3. Moderado	≤ 1.4 -> 1.2		10-20
4. Malo	≤ 1.2 -> 1.0		5-10
5. Muy malo	≤ 1.0		< 5
Respuesta			
Valor/categoría	Frecuencia de monitoreo		
1. Muy bueno	Monitoreo continuo, sistema de consulta organizado en un SIG		
2. Bueno	Monitoreo continuo de baja frecuencia (mensual o estacional) con sistema de consulta organizado		
3. Moderado	Monitoreo continuo de baja frecuencia (mensual o estacional) sin sistema de consulta organizado		
4. Malo	Monitoreo ocasional sin sistema de consulta organizado		
5. Muy malo	Ningún monitoreo		

Cuadro 4. Rangos para cada categoría y valor asignado en la reclasificación de los indicadores PER para la función sumidero.

Función sumidero				
Presión				
Valor/categoría	Superficie de uso residencial (%)			
1. Muy bueno	< 10			
2. Bueno	10- 30			
3. Moderado	30-50			
4. Malo	50-70			
5. Muy malo	≥ 70			
Estado				
Valor/categoría	CE mS/cm	NO ₃ (mg/l)	OD (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)
1. Muy bueno	< 0.8	< 15	> 12	≤ 2
2. Bueno	0.8-1.0	15-25	8-12	2-10
3. Moderado	1.0-1.5	25-35	5-8	10-20
4. Malo	1.5-2.0	35-45	0-5	20-50
5. Muy malo	≥ 2.0	≥ 45	0	> 50
Respuesta				
Valor/categoría	Autoridad de control			
1. Muy bueno	Municipal con plan de manejo			
2. Bueno	Municipal sin plan de manejo			
3. Moderado	Provincial. Muy limitada la intervención municipal			
4. Malo	Nacional y provincial. Sin intervención municipal			
5. Muy malo	No definida			

Cuadro 5. Rangos para cada categoría y valor asignado en la reclasificación de los indicadores PER para la función soporte/servicios.

Función soporte/servicios	
Presión	
Valor/categoría	Densidad poblacional área de influencia (hab/km ²)
1. Muy bueno	< 2.5
2. Bueno	≥ 2.5 -< 5.0
3. Moderado	≥ 5.0 -< 10.0
4. Malo	≥ 10.0 -< 20.0
5. Muy malo	≥ 20.0
Estado	
Valor/categoría	Zp/Zf
1. Muy bueno	≤ 0.97
2. Bueno	> 0.97 - ≤ 1.37
3. Moderado	> 1.37 - ≤ 5.07
4. Malo	> 5.07 - ≤ 8.53
5. Muy malo	> 8.53
Respuesta	
Valor/categoría	Usos restringidos/controlados
1. Muy bueno	Todos los usos están controlados de manera permanente
2. Bueno	Los usos extractivos y potencialmente contaminantes están controlados de forma permanente
3. Moderado	Los usos extractivos y potencialmente contaminantes están controlados de modo esporádico
4. Malo	Los usos extractivos o potencialmente contaminantes están controlados de forma esporádica
5. Muy malo	Ningún uso controlado

Cuadro 6. Valores de los índices de cada función ecosistémica y de calidad ambiental para las lagunas estudiadas.

Laguna	Índices de las funciones ecosistémicas				ICA
	IN	IF	IS	ISS	
La Brava	3.50	2.16	1.48	3.43	2.64
Los Padres	3.17	2.55	1.62	3.76	2.77

comparación con la laguna La Brava, con excepción de IN. En este último caso, la laguna de Los Padres posee mayor porcentaje de cobertura natural-pastizales en su cuenca de drenaje y de vegetación acuática emergente, en comparación con la otra laguna (33.58 y 24.44%, y 25.11 y 11.3%, respectivamente).

El análisis de los índices para cada una de las funciones abordadas indica que las funciones más afectadas son las de soporte de actividades/provisión de servicios y el grado de naturalidad (figura 3). La mayor influencia

negativa en la cualidad soporte-servicio está en los indicadores relacionados con el crecimiento demográfico, y también en la falta de restricción y/o control en el desarrollo de actividades extractivas o potencialmente contaminantes. Las determinaciones de los indicadores propuestos para el grado de naturalidad expresan que la mayor afectación se obtiene en los indicadores relacionados con el recurso suelo en lo que respecta al poco porcentaje de cobertura natural-pastizales, y al bajo o nulo porcentaje de territorio protegido.

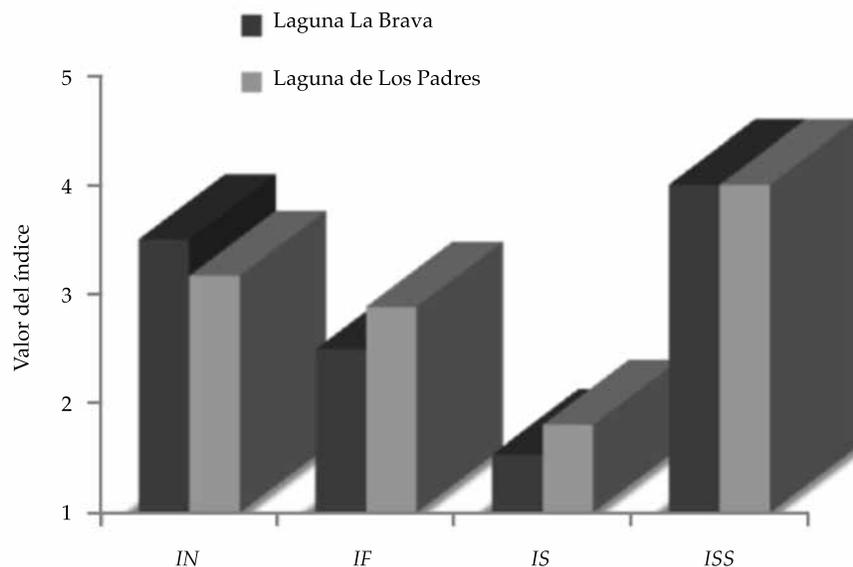


Figura 3. Índices de cada función ecosistémica para las dos lagunas pampeanas en estudio.

Un hecho llamativo en el análisis hecho es el relacionado con los valores obtenidos para los indicadores de la calidad de sumidero de residuos, siendo la función menos impactada. En este caso, los mismos no reflejan los resultados que se esperaban, sino que muestran cómo el medio ha sido capaz de soportar las cargas potenciales de contaminantes generadas. Sin embargo, cabe señalar que los indicadores de mayor significado para esta calidad del medio son los relacionados con el contenido de NO_3^- . Si bien los valores de este parámetro en las lagunas son, en promedio, de 6.98 y 1.55 mg/l para Los Padres y La Brava, respectivamente, se ha encontrado contenido elevado de nitratos (> 24.0 mg/l) en el agua subterránea de la zona de recarga a la misma. Esto podría producir un impacto negativo sobre estos cuerpos de agua al recibir el aporte del acuífero, dada su condición efluente-influente.

Al analizar los valores de los índices PER para ambas lagunas (figura 4), se observa que los indicadores de respuesta presentan los valores de peor calidad en el modelo, evidenciando la falta de actuación del hombre para contrarrestar los impactos sobre el medio. Los indicadores de

presión para la laguna de Los Padres presentan las mayores afectaciones negativas, vinculadas con la alta densidad poblacional en la cuenca (50.9 hab/ km^2) y, en menor medida, por el número de instalaciones recreativas/turísticas (9) localizadas en sus márgenes, existiendo en la laguna La Brava cuatro instalaciones y 15.8 hab/ km^2 . Por el contrario, para la laguna La Brava se detectaron los mayores valores en los indicadores de estado, relacionados con el bajo porcentaje de pastizales naturales (25.11%) y de cobertura de vegetación emergente (11.3%), siendo en la laguna de Los Padres de 33.58 y 24.44%, respectivamente.

Un análisis más detallado de los indicadores PER para cada una de las funciones ecosistémicas por laguna se visualiza en la figura 5. En ellas se observa que los indicadores de presión son los de peor calidad para la función sumidero de residuos, los de estado para la función fuente de recursos y, por último, los de respuesta para la función soporte de actividades/provisión de servicios y el grado de naturalidad. Este patrón se da en ambas lagunas estudiadas.

Los indicadores individuales que describen la condición del medio natural en sus distintas

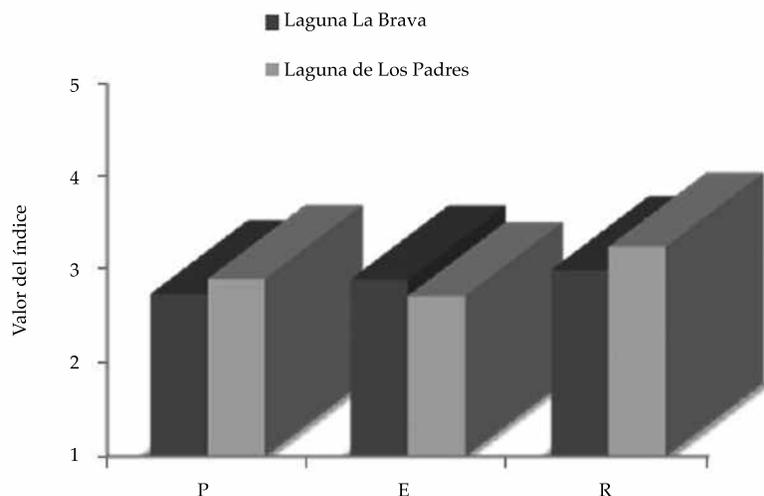


Figura 4. Índices de los indicadores PER para las dos lagunas pampeanas en estudio.

dimensiones a menudo pueden ser medidos y determinados de manera objetiva. Cuando se trata de una combinación de estos indicadores en un único índice, la subjetividad se incrementa. En este sentido, los indicadores individuales pueden ser normalizados y reducidos a una escala numérica común y comparable, y luego, a través de operaciones matemáticas, pueden combinarse en índices parciales o integrarse en un único índice (Cendrero & Fischer, 1997). Esto no elimina la subjetividad, ya que deben establecerse ciertos criterios (selección de los indicadores, procedimientos de agregación de índices, asignación de pesos, etc.) y no todos estarán de acuerdo con el criterio propuesto.

La disponibilidad de información resultó ser un factor limitante a la hora de seleccionar los indicadores PER para cada una de las funciones ecosistémicas abordadas. De la misma manera, contando con información histórica hubiese sido posible realizar un análisis de los índices a una escala temporal, evidenciando las tendencias en la calidad ambiental de los recursos naturales estudiados. Muchos indicadores considerados importantes a la hora de evaluar la calidad ambiental de las lagunas pampeanas no pudieron ser incluidos en los distintos índices, pues dicha información no estaba disponible. Indicadores

de presión, como el número de visitantes a las lagunas y el número de piezas capturadas por los pescadores e indicadores de estado como clorofila *a*, DQO y concentración de pesticidas en el agua hubieran sido de mucha utilidad.

Los indicadores individuales que se utilizan para calcular los índices pueden variar en el tiempo, sobre todo como resultado de las circunstancias socioeconómicas, manejo y uso. Como consecuencia, el cálculo de los índices puede ser utilizado para monitorear y determinar la evolución de tendencias dentro de una determinada zona o región, y comparar dichas tendencias entre las diferentes regiones. Aunque los índices propuestos no deben considerarse como una medida precisa de la calidad del ambiente, es razonable suponer que una disminución en el valor de dichos índices representa una tendencia hacia una mejor calidad ambiental y una mayor sustentabilidad, y viceversa.

En esta propuesta de indicadores PER se utilizaron aquellos parámetros de los cuales se disponía información y de fácil medición para el usuario. Asimismo, se trabajará para reemplazar y/o ajustar aquellos indicadores que no cumplen por completo con los requisitos para tal fin.

Se puede argumentar con razón que los índices propuestos representan una simplificación

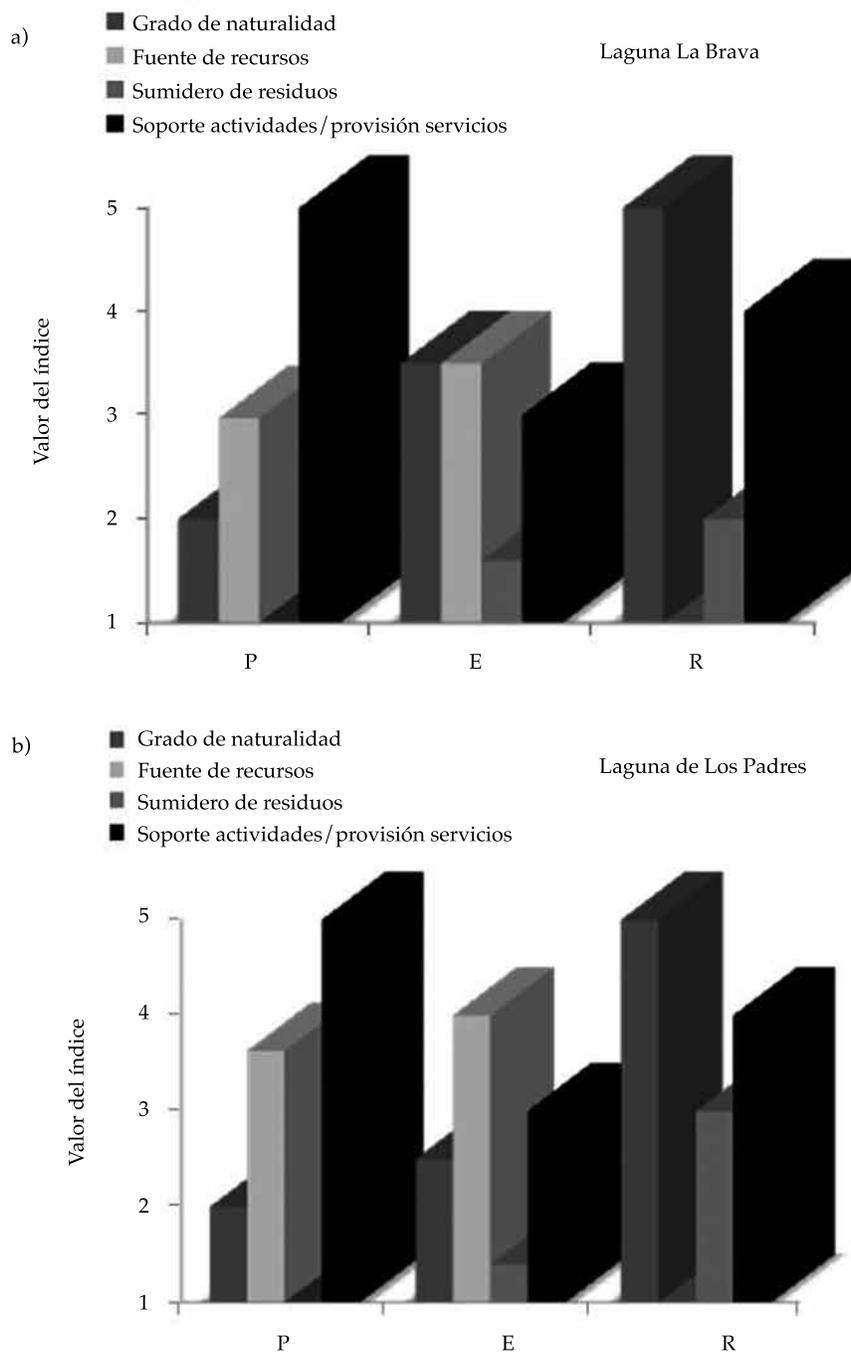


Figura 5. Índices de los indicadores PER para cada función ecosistémica en: a) laguna La Brava y b) laguna de Los Padres.

exagerada de la calidad del ambiente y que es una representación pobre de la realidad. Sin embargo, ofrecen representaciones útiles, destacando a menudo las características importantes del medio que pueden no ser tan obvias.

Respecto al marco conceptual de indicadores utilizado, siguiendo el modelo causa-efecto (PER), una desventaja en su uso es la posible dependencia de un modelo falso o falsas relaciones entre los indicadores. Es decir, pueden hacerse

falsos supuestos sobre el teorema de causalidad lineal (la presión causa el estado, el cual a su vez, resulta en una respuesta). Muchas veces, un mismo estado puede ser provocado por diversas presiones sobre el ambiente.

Conclusiones

La creación y aplicación de un sistema de indicadores constituyó un valioso aporte, pues por primera vez se aplica este procedimiento metodológico en la región. Además, ofreció la posibilidad de expresar la calidad ambiental de lagunas pampeanas en forma cuantitativa, mediante el uso de índices basados en métodos claros y reproducibles, a través de indicadores que pueden medirse o determinarse de manera objetiva. A su vez, la creación del índice de calidad ambiental permitió integrar información, incluyendo datos morfológicos, hidroquímicos, de uso del suelo y sociales. La aplicación de esta metodología proporciona una herramienta útil para el monitoreo de la calidad ambiental de las lagunas pampeanas, contribuyendo así a evaluar la sustentabilidad ambiental, al igual que las prácticas y políticas existentes. Sin embargo, se requiere continuar mejorando el método, y luego validarlo en distintas zonas, a fin de comprobar su robustez.

Los resultados indican que es necesario intervenir de manera prioritaria en las variables relacionadas con ocupación poblacional y generación de medidas de control de uso en ambos ecosistemas acuáticos estudiados. Desde el punto de vista de la gestión de los recursos naturales, el hecho de que las lagunas estudiadas tengan una calidad ambiental moderada, perteneciendo a la clase III ($\geq 2.6 < 3.4$), resulta ser un aspecto positivo, pues ofrece posibilidades de intervención para evitar el deterioro de las mismas. Sin embargo, es posible que estos sistemas naturales migren a cualquiera de los dos extremos: a la mejor o peor condición ambiental; ello obliga a plantear y efectuar acciones que permitan una adecuada planificación y manejo del recurso, propendiendo a la búsqueda de escenarios de mejores características.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (EXA 514/10; EXA 606/12) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (PIP 0350) por el financiamiento.

Referencias

- Aguilera, H., Moreno, L., Castaño, S., Jiménez, M. E., & De la Losa, A. (2009). Contenido y distribución espacial de nutrientes móviles en la zona no saturada en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. *Boletín Geológico y Minero*, 120(3): 393-408.
- Alcaide-Orpí, J., Jaimez Salgado E., Olivera Acosta J., Valdés Hernández G., Díaz J. R., De Terán M., & Soto Torres J. (2006). Sistema de indicadores para la evaluación de la calidad ambiental del Municipio Bauta, La Habana, Cuba. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 10(41), 263-268.
- Appelo, C. A. J., & Postma D. (1993). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (563 pp.). Rotterdam, Netherlands: Balkema.
- Bain, M. B., Stevenson, N. J. (1999). *Aquatic Habitat Assessment: Common Methods* (136 pp.). Maryland, USA: American Fisheries Society, Bethesda.
- Cendrero, A. (1997). Indicadores de desarrollo sostenible para la toma de decisiones. *Naturzale*, 12, 5-25.
- Cendrero, A., & Fischer, D. W. (1997). A Procedure for Assessing the Environmental Quality of Coastal Areas for Planning and Management. *Journal of Coastal Research*, 13(3), 732-744.
- Cendrero, A., Francés, E., Del Corral, D., Fermán, J. L., Fischer, D., Del Río, L., Camino, M., & López, A. (2003). Indicators and Indices of Environmental Quality for Sustainability Assessment in Coastal Areas; Application to Case Studies in Europe and Americas. *Journal of Coastal Research*, 19(0), 7-21.
- CEPE (2007). Marcando el progreso: los indicadores señalan el camino (pp. 30-60). En: *Agua para todos, agua para la vida. Primer Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*. Comisión Económica de Naciones Unidas para Europa. Recuperado de: http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr1/pdf/chap3_es.pdf
- Custodio, E., & Llamas, M. (1976). *Hidrología subterránea* (2359 pp.). Barcelona: Ed. Omega.
- EPA (1994). *Indicators Development Strategy, Environmental Monitoring Assessment Program*. Environmental Protection Agency. North Carolina: EMAP Center, EPA 620/R-94/022.
- Fernández-Cirelli, A., & Miretzky, P. (2002). Lagos poco profundos de la Pampa Argentina. Relación con aguas subterráneas someras (43-52 pp.). En: *El agua en Iberoamérica. De la limnología a la gestión en Sudamérica*.

- Fernández-Cirelli, A., & Chalar-Marquisá, G. (eds.). Buenos Aires: CYTED XVII, Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos.
- Fernández-Cirelli, A., & Miretzky, P. (2004). Ionic Relations: A Tool for Studying Hydrogeochemical Processes in Pampean Shallow Lakes (Buenos Aires, Argentina). *Quaternary International*, 114, 113-121.
- Gouzee, N., Mazijn, B., & Billharz, S. (1995). *Indicators of Sustainable Development for Decision-Making*. Bruselas: Federal Planning Office.
- Grosman, F. (2008). *Espejos en la llanura. Nuestras lagunas de la región pampeana* (174 pp.). Buenos Aires: Ed. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Hammond, A., Adriaanse, A., Rodenburg, E., Bryant, E., & Woodward, R. (1995). *Environmental Indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development*. Washington, DC: World Resources Institute.
- INDEC (2012). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010: Censo del Bicentenario: Resultados Definitivos* (378 pp). Vol. 1. Serie B, núm. 2. Buenos Aires: Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Iriondo, M., & Kröhling, D. (2007). Geomorfología y sedimentología de la cuenca superior del río Salado (sur de Santa Fe y noroeste de Buenos Aires, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 14(1), 1-23.
- MA (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment. Report to the Ramsar Convention*. Washington, DC: World Resources Institute, Millennium Ecosystem Assessment. Recovered from: <http://epa.gov/ncer/events/calendar/2007/sep26/millennium.pdf>.
- Niemeijer, D., & De Groot, R. (2008a). A Conceptual Framework for Selecting Environmental Indicator Sets. *Ecol. Ind.*, 8, 14-25.
- Niemeijer, D., & De Groot, R. (2008b). Framing Environmental Indicators: Moving from Causal Chains to Causal Networks. *Environ Dev. Sustain.*, 10, 89-106.
- OECD (1991). *Environmental Indicators: A Preliminary Set*. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development.
- OECD (2001). *Environmental Indicators: Towards Sustainable Development* (155 pp.). Paris: Organization for Economic Cooperation and Development.
- OECD (1993). *Report N° 83* (39 pp.). Date of reference: February 1st of 2015. Organization for Economic Cooperation and Development. Recovered from <http://enrin.grida.no/htmls/armenia/soe2000/eng/oecdind.pdf>.
- Oliveira, S. V., & Cortes, R. M. V. (2006). Environmental Indicators of Ecological Integrity and their Development for Running Waters in Northern Portugal. *Limnetica*, 25(1-2), 479-498.
- Quirós, R., Rennella, A., Boveri, M., Rosso, J. J., & Sosnovsky, A. (2002). Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral*, 12, 175-185.
- Romanelli, A., Quiroz-Londoño, O. M., Massone, H. E., Martínez, D. E., & Bocanegra, E. (2010). El agua subterránea en el funcionamiento hidrológico de los humedales del Sudeste Bonaerense, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 121(4), 373-386.
- Romanelli, A., Massone, H. E., & Escalante, A. (2011). Stakeholder Analysis and Social-Biophysical Interdependencies for Common Pool Resource Management: La Brava Wetland (Argentina) as a Case Study. *Environmental Management*, 48(3), 462-474.
- SCOPE (1995). *Indicators of Sustainable Development for Decision-Making*. Report of the Workshop of Ghent, Belgium. Scientific Committee on Problems of the Environment. Recovered from <http://www.un.org/esa/documents/ecosoc/cn17/1995/ecn171995-32.htm>
- UN (1984). *A Framework for the Development of Environmental Statistics*. Statistical Papers Series # 78. New York: United Nations. Recovered from http://unstats.un.org/unsd/publication/SeriesM/SeriesM_78e.pdf.
- Whited, D., Galatowitsch, S., Tester, J. R., Schik, K., Lehtinen, R., & Husveth, J. (2000). The Importance of Local and Regional Factors in Predicting Effective Conservation Planning Strategies for Wetland Bird Communities in Agricultural and Urban Landscapes. *Landsc. Urban Plann.*, 49, 49-65.
- WHO (1982). *Rapid Assessment of Sources of Air, Water, and Land Pollution*. World Health Organization. *WHO Offset Publication*, 62, 113.

Dirección institucional de los autores

Dra. Asunción Romanelli

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (IIMyC)
 Universidad Nacional de Mar del Plata-CONICET
 Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCyC)
 Universidad Nacional de Mar del Plata-CIC
 Funes 3350, nivel 1
 7600 Mar del Plata, ARGENTINA
 Teléfono: +54 (223) 4754 060
 aromanel@mdp.edu.ar

Dr. Héctor Enrique Massone

Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCyC)
 Universidad Nacional de Mar del Plata-CIC
 Funes 3350, nivel 1
 7600 Mar del Plata, ARGENTINA
 Teléfono: +54 (223) 4734 635
 hmassone@mdp.edu.ar