

## DESARROLLO DE UN INDICADOR SINTÉTICO PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL EN ZONAS COSTERAS DE COLOMBIA

Lizbeth J. Vivas-Aguas<sup>1</sup>, Paula C. Sierra-Correa<sup>1</sup> y Luis A. Escobar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa Calidad Ambiental Marina, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis”. Cerro Punta Betín, A.A. 1016, Santa Marta, Colombia.

<sup>2</sup>Escuela De Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente - Eidenar, Universidad del Valle, Ciudadela Universitaria Meléndez, Cali, Colombia

[lescobar@univalle.edu.co](mailto:lescobar@univalle.edu.co), [janeti@invemar.org.co](mailto:janeti@invemar.org.co), [psierra@invemar.org.co](mailto:psierra@invemar.org.co)

### RESUMEN

En esta investigación se construyó un modelo de índice para evaluar la calidad ambiental costera (ICACO) como una variable latente determinada por un conjunto de factores que la afectan de manera positiva y negativa, a partir de la no homogeneidad ambiental del territorio. El modelo se desarrolló con 12 indicadores en las temáticas de agua, aire, suelo, fauna y flora, que definieron el estado ambiental de la zona costera. Los indicadores operativos fueron seleccionados empleando criterios de validez científica para tipificar áreas costeras prioritarias, así como para formular estrategias eficaces que sirvan para el control, manejo y protección de los ecosistemas costeros. Como resultado de la investigación se probó la consistencia estadística del índice estimado, mediante factores ambientales usando análisis de componentes principales para sintetizar la información del conjunto de indicadores que explicaban el ICACO. Una vez estimado el índice se identificaron y ordenaron, de menor a mayor, las unidades espaciales (trabajadas con sistemas de información geográfica) y se identificaron los principales factores que determinan la calidad ambiental en cada sector de la Unidad de Manejo Integrado (UMI) Guapi–Iscuandé, en el Pacífico colombiano.

**Palabras Clave:** indicadores ambientales, calidad ambiental marina, análisis multivariado

### ABSTRACT

In this study we constructed a model index to assess coastal environmental quality (ICACO) as a latent variable determined by a set of factors that affect in positive and negative ways, from the environmental non-homogeneity of the territory. The model was developed with 12 indicators in the thematic of water, air, soil, fauna and flora, which defined the environmental status of the coastal zone. The operational indicators were selected using criteria of scientific validity to typify priority coastal areas as well as to develop effective strategies to serve for control, management and protection of coastal ecosystems. As a result of the investigation we tested the statistical robustness of the estimate index by means of environmental factors using principal components analysis to synthesize the information of the set of indicators that explained the ICAC. Having estimated this index, the spatial units (worked with geographic information systems) were identified and ordered in increasing way and the main factors that determine the environmental quality in every sector of the Integrated Management Unit (IMU) Guapi-Iscuandé in the Colombian Pacific were identified.

**Keywords:** Environmental indicators, marine environmental quality, multivariate analysis

## INTRODUCCIÓN

La degradación costera y los conflictos de uso son preocupaciones de la comunidad internacional que ha desarrollado enfoques de manejo integrado de zonas costeras, porque estos ecosistemas allí presentes viven en permanente estado de cambio como sitios de alta demanda ambiental (Unesco, 2006). Las diversas actividades productivas en el litoral son esenciales desde el punto de vista económico y social, pero generan a largo plazo degradación negativa de los ecosistemas y recursos marino-costeros (MMA, 2001). Para entender los cambios en estos ecosistemas y evitar su deterioro se requieren instrumentos que midan tendencias y comuniquen información de forma sencilla como los indicadores ambientales desarrollados por varias iniciativas internacionales y nacionales para monitorear el estado del ambiente costero (Unesco, 2006). En este orden de ideas, Escobar (2006) plantea que los indicadores ambientales simples y sintéticos son información esencial para la construcción de política pública, porque permiten resumir una gran cantidad de datos para facilitar la comunicación de las situaciones ambientales a diferentes grupos sociales de forma sencilla. De hecho, los indicadores e índices de alto nivel de agregación ubicados en la parte superior de una pirámide representan (Figura 1) un modelo empírico de la realidad con datos primarios, no la realidad misma, sino que deben ser analíticos y disponer de una metodología fija de medición (Hammond *et al.*, 1995).

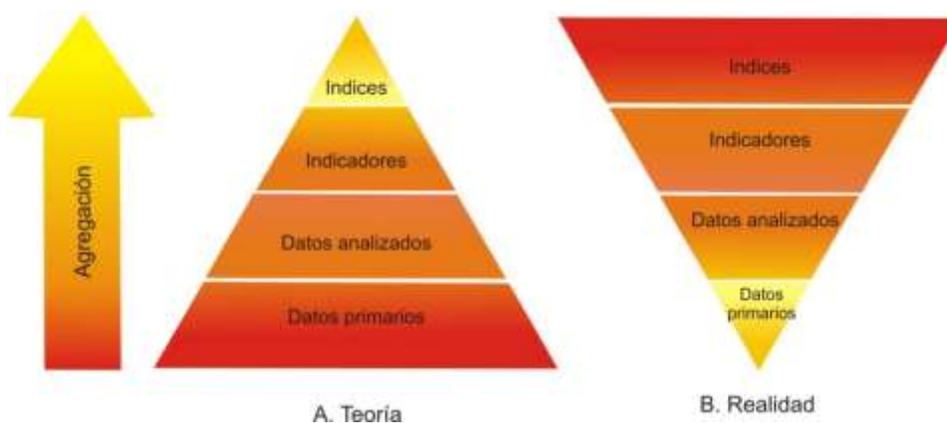


Figura 1. Pirámide de información. Niveles de agregación desde el análisis de datos hasta índices.

En Colombia el tema de indicadores ambientales es relativamente reciente, en 2002 se realizó la primera aproximación documentada de indicadores para zonas costeras que incluyó 11 indicadores de temas costeros (Castaño & Carrillo, 2002), en la actualidad se trabaja en la iniciativa de la Red de información y datos del Pacífico Sur para el apoyo a la Gestión Integrada del Área Costera–SPINCAM (por sus siglas en inglés) con indicadores socioeconómicos, de gobernabilidad y ecológicos para un enfoque regional (INVEMAR, 2010). A pesar de estos esfuerzos se sigue manejando la información de forma fragmentada que no permite crear una visión global ni caracterizar los problemas de sistemas complejos con situaciones ambientales (positivas y negativas) que presentan diferencias significativas entre una misma zona. Lo anterior, justifica y motiva el desarrollo de un indicador sintético capaz de evaluar el estado y hacer seguimiento a la calidad ambiental de las zonas costeras en un concepto integrado que permita a los tomadores de decisiones diseñar y priorizar estrategias ambientales de forma diferencial en distintas porciones del territorio en la zona costera.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El proceso metodológico empleado en esta investigación (

Figura 2) consistió de: 1) Colección de información básica y revisión bibliográfica del marco conceptual y experiencias en construcción de indicadores ambientales costeros a escala global, regional y local; 2) Definición del concepto de calidad ambiental costera como objeto de investigación, con revisión detallada en formulaciones de modelos de índices relacionados con la investigación, se definieron los indicadores teóricos y se aplicaron criterios de selección para determinar los indicadores que serán utilizados en el índice de acuerdo a la disponibilidad de información; 3) En una tercera parte se estableció y describió la metodología para construir el índice de calidad ambiental costera, mediante sistemas de información geográfica y estadística multivariada usando el análisis de componentes principales (ACP) como una medida de síntesis de información; 4) Estimación empírica del índice de calidad ambiental costera – ICACO en siete unidades de observación de la unidad de manejo integrado (UMI) Guapi – Icuandé en la costa del Pacífico colombiano. Finalmente se identifican y ordenan, de menor a mayor, las unidades espaciales de acuerdo al valor de índice y se identifican los principales factores que determinan la calidad ambiental en cada unidad.

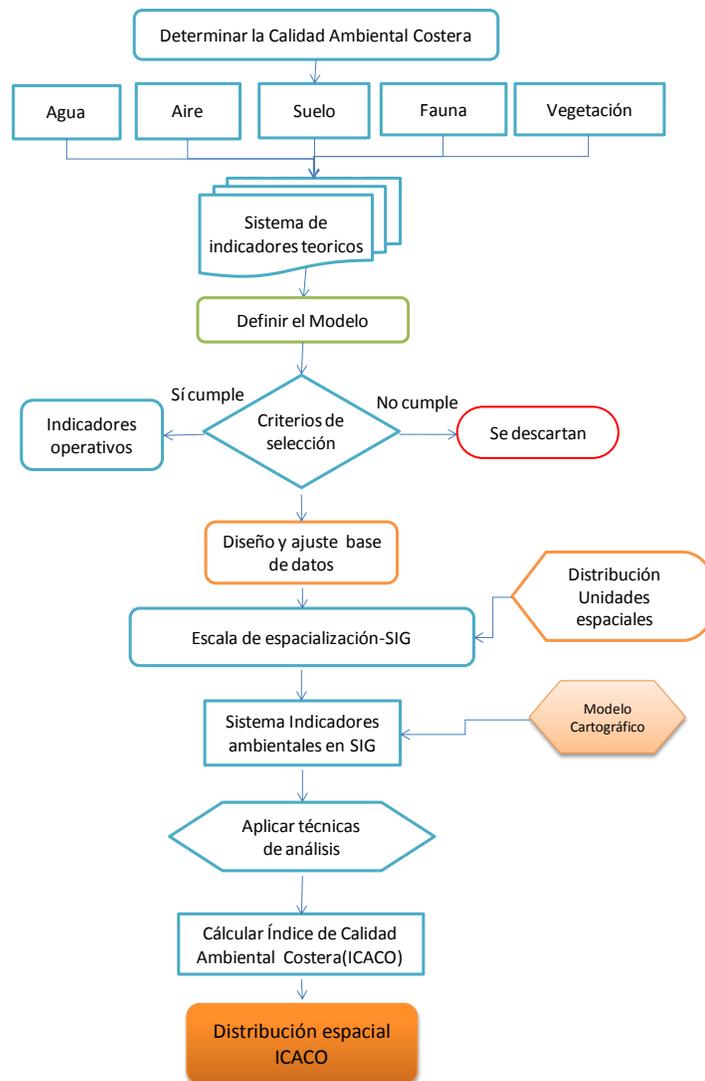


Figura 2. Proceso metodológico para el desarrollo del índice de calidad ambiental costera – ICACO

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer resultado para la construcción de indicadores para zonas costeras es la adopción del concepto de calidad ambiental y su vínculo con el bienestar social o calidad de vida. En este trabajo la calidad ambiental costera se refiere a la capacidad que tiene el ambiente costero para proporcionar una serie de *bienes y servicios* ambientales que inciden positivamente (o negativamente) en los factores ambientales, en la calidad de vida o bienestar de la sociedad (Unesco, 2006; Escobar, 2006). En este sentido, el concepto de *estado* se refiere al nivel actual de un recurso comparado con respecto a un valor de referencia de su calidad en

el entorno costero en función de la percepción de *estado* y *cambio de estado* (Baan & Van Buuren, 2003).

El modelo propuesto se limitó a indicadores ecológicos que caracterizan el estado del ambiente, orientados hacia el estudio de las funciones ecosistémicas de un territorio. De la revisión general de más de 200 indicadores costeros, se preseleccionó la primera lista de 25 indicadores teóricos susceptibles de integrar el modelo ambiental costero definido en las 5 áreas temáticas del agua, aire, suelo, vegetación y fauna, los cuales se sometieron a criterios de selección de validez científica para derivar el sistema final de 12 indicadores simples aplicables y comparables en zonas costeras (

Figura 3) utilizando el enfoque y directrices de manejo integrado de costas y océanos.

ÍNDICE	ÁREA TEMÁTICA	INDICADORES SIMPLES
Índice de calidad ambiental costera ICACO	Agua ( <i>Iagu</i> )	AG1 Calidad para preservación de flora y fauna (%)
		AG2 Calidad para recreación y pesca (%)
	Aire ( <i>Iair</i> )	AI1 Emisión metano -CH <sub>4</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
	Suelo ( <i>Isue</i> )	SU3 Drenaje (N°)
		SU4 Fertilidad (N°)
		SU6 Toxicidad (N°)
	Vegetación ( <i>Iveg</i> )	VE1 Extensión (área) (m <sup>2</sup> )
		VE2 Estrato (Altura) (N°)
		VE3 Densidad (No)
	Fauna ( <i>IFau</i> )	FA1 sp. vulnerables (N°)
		FA2 sp. Reportadas (N°)
		FA3 Estado fauna (%)

Figura 3. Sistema de indicadores de calidad ambiental costera

#### Construcción del índice de calidad ambiental costera – ICACO

El desarrollo conceptual del ICACO se fundamentó en un modelo matemático con 7 ecuaciones para ir agregando datos de manera consecutiva, sintetizando la información de indicadores simples hasta el índice. La ecuación 1 representa el *índice sintético* como una variable latente que recoge las características en distintas áreas a un nivel agregado del entorno (Freeman, 1993).

$$ICACO_{Cuenca(j)} = \frac{\sum_{i=1}^r z_{rj} \cdot \sqrt{\lambda_r}}{\sum_{i=1}^r \sqrt{\lambda_r}} ; j = 1, 2, \dots, 7$$

Ecuación 1

Para validar el ICACO se construyó una base de datos con información del área de estudio a Escala 1:50.000, la cual contenía 890 registros de fauna, 784 de vegetación, 496 de suelo y 719 de calidad de aguas marino-costeras. Para el tema aire se utilizó el factor teórico para emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) del IPCC (2006) para que la ausencia de datos no limitara el modelo. La base de datos se ajustó de acuerdo a las unidades espaciales de observación (cuencas) con un Sistema de Información Geográfica en ArcGis 9.3 (López *et al.*, 2003). En las siete cuencas de la UMI-Guapi-Iscuandé se validó el ICACO y se estimaron con el software SPSS 19.0 los componentes principales y las estimaciones para probar la consistencia de los resultados con la matriz ACP rotada (Cuadro 1). Se escogieron 3 componentes con autovalores mayores a 1 que expresaron el 91,55% de la varianza explicada por los datos.

Cuadro 1. Resultados del análisis de componentes principales matriz rotada.

Área temática	Indicadores de primer nivel	Componentes			Comunalidades
		1	2	3	
Fauna	FA1. sp. vulnerables	0,98			0,97
	FA2. sp. reportadas	-0,91			0,88
	FA3. Estado fauna	0,90			0,81
Agua	AG1. Calidad agua preservación			0,98	0,98
	AG2. Calidad agua recreación			0,99	0,98
Vegetación	VE1. Extensión		0,90		0,81
	VE2. Altura	-0,75	-0,49		0,88
	VE3. Densidad	0,67	0,54	0,50	0,99
Suelo	SU3. Drenaje		0,93		0,99

Área temática	Indicadores de primer nivel	Componentes			Comunalidades
		1	2	3	
	SU4. Fertilidad	0,77	0,49		0,83
	SU6. Toxicidad		0,95		0,97
Aire	AI1. Emisión metano (CH <sub>4</sub> )	-0,82			0,89
	<i>Autovalores</i>	6,335	2,801	1,850	10,986
	<i>Varianza</i>	52,793	23,343	15,413	Acum: 91,55%

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Método de rotación: Normalización Varimax con Kaiser.

Determinante = 0.000

La matriz ACP rotada maximizó la correlación entre los indicadores y expuso que el estado de las unidades espaciales o cuencas depende de sus características, porque el primer factor está determinado por las especies vulnerables (FA1), especies reportadas (FA2), estado fauna (FA3), altura vegetación (VE2), Densidad vegetación (VE3), fertilidad del suelo (SU4) y emisiones de metano (AI1). El segundo explica la relación entre la extensión de la vegetación (VE1), Drenaje (SU3) y Toxicidad del suelo (SU6) y el tercer factor la calidad del agua para preservación (AG1) y para recreación y pesca (AG2).

Con los resultados del ACP y las cargas factoriales se hizo la agregación ponderada del índice con la ecuación 1, de donde se derivó la clasificación ordenada de las cuencas según el valor del ICACO y la distribución espacial (Figura 4) para identificar las cuencas que comparten esta característica sintética y que pueden ser catalogadas como homogéneas desde el punto de vista de la calidad ambiental costera.

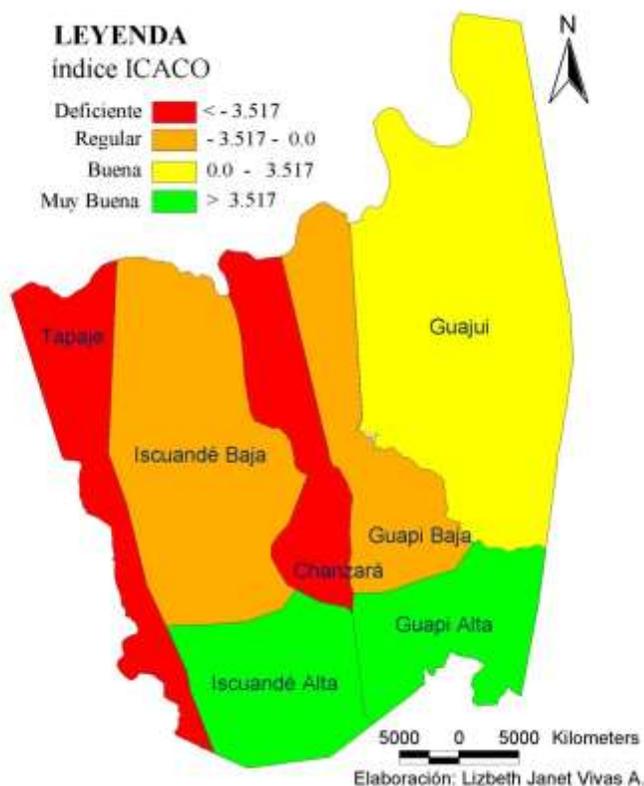


Figura 4. Mapa del índice de calidad ambiental costera en las cuencas de la UMI.

## CONCLUSIONES

A partir de este trabajo se logró la construcción del índice ICACO, herramienta de agregación de información que permite evaluar el estado ambiental de zonas costeras bajo un concepto integrado. Los resultados del índice definen el estado o línea base de la situación ambiental de un área, con énfasis en la diferenciación espacial del grado de intervención en los diversos sectores de un área y logra establecer criterios de prioridad en la asignación del uso de recursos. Operativamente los resultados muestran un instrumento robusto para apoyar el seguimiento, control y evaluación de la gestión pública en materia ambiental en zonas costeras.

## REFERENCIAS

Baan, P. J. & Van Buuren J. T. (2003). Testing of indicators for the marine and coastal environment in Europe part 3: Present state and development of indicators for

- eutrophication, hazardous substances, oil and ecological quality. *Technical report 86*. EEA. Copenhagen, 90 p.
- Castañó, C. & Carrillo R. (Eds.), (2002). *Primera Generación de Indicadores de la Línea Base de la Información Ambiental de Colombia. Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC*. Tomo 2. IDEAM/SINCHI/IAVH/IIAP/INVEMAR, Bogotá, 941 p.
- Escobar, L. A. (2006). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. *Eure*, 32(96), 73-98.
- Freeman III, M. A. (1993). *The measurement of environmental and resource values: theory and methods*. Resources for the Future. Washington, 516 p.
- Hammond, A., Adriaanse, A., Rodenburg, E., Bryant, D. & Woodward, R. (1995). *Environmental Indicators: A systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development*. World Resources Institute, Washington, 58 p.
- Invemar-Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. (2010). *Red de Información y datos del Pacífico Sudeste para el apoyo a la gestión integrada del Área Costera – SPINCAM Colombia*. Informe Técnico. Santa Marta, 12 p.
- López A. C. & Sierra-Correa, P.C. (2003). *Formulación del Plan de manejo integrado de la zona costera del complejo de las bocanas Guapi Iscuandé, Pacífico colombiano. Fase I: Caracterización y Diagnóstico*. INVEMAR-CRC-CORPONARIÑO-IIAP. Santa Marta, 575 p.
- MMA–Ministerio de Medio Ambiente de Colombia. (2001). *Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia. Dirección de Ecosistemas*. MMA. Bogotá, 95 p.
- Unesco. (2006). *A Handbook for Measuring the Progress and Outcomes of Integrated Coastal and Ocean Management*. IOC Manuals and Guides, 46; ICAM Dossier, 2. Paris, 217 p.