

Modelación de la eutroficación e índice de calidad del agua en algunas bahías del archipiélago Sabana Camagüey

Modelation of the Eutrophication and Water Quality Index in Some bays of Sabana Camagüey Archipelago

MSc. José F. Montalvo^I, Lic. Ileana de los A. García-Ramil^I, MSc. Mariela Almeida Rodríguez^{II}, Esp. Abel Betanzos Vega^{III}, MSc. Norma García García^{IV}

I: Instituto de Oceanología, Playa, Habana, Cuba. montalvo@oceano.inf.cu

II: Oficina de Manejo Integrado Costero, Centro de Servicios Ambientales de Matanzas (CSAM), Varadero, Matanzas, Cuba. ileana@oceano.inf.cu

III: Centro de Investigaciones Pesqueras, Playa, Habana, Cuba. abetanzos@cip.telemar.cu

IV: Centro de Estudios Ambientales de Villa Clara, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

RESUMEN

A partir de muestreos realizados entre los años 2001 y 2011, se determinó el grado de eutroficación y las afectaciones de la calidad del agua en las bahías de, Cárdenas, Santa Clara Oeste, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buena Vista, De Perros, Jigüey, La Gloria y Nuevitas, mediante modelos que emplean las concentraciones de oxígeno disuelto, demanda bioquímica y química de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total y clorofila "a". En las bahías Buenavista, De Perros y Jigüey el grado de eutroficación obtenido a partir del índice de nutrientes IN, indicó que están sometidas a procesos de eutroficación, en las otras bahías objeto de estudio prevalecieron las condiciones oligo-mesotróficas de acuerdo a los valores de $IN < 4$. Las bahías Cárdenas, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, Los Perros y Jigüey mostraron un marcado deterioro de la calidad del agua, asociado a la conjugación de factores como la influencia antropogénica y la pobre remoción del agua.

Palabras clave: nutrientes, eutroficación, calidad del agua, contaminación.

ABSTRACT

From sampling taken between 2001 and 2011, was determined the degree of eutrophication and water quality affectations in the bays Cárdenas, Santa Clara Oeste, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, De Perros, Jigüey, La Gloria and Nuevitas, by means models that use the concentration of dissolved oxygen, biochemical and chemical oxygen demand, total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll "a". In the bays Buena Vista, De Perros and Jigüey the degree of eutrophication obtained from the nutrients index NI, indicated that they are subdued to processes of eutrophication, in the other bays object of study prevailed the condition oligo- mesotrophic according to the values of $NI < 4$. The bays Cárdenas, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, De Perros and Jigüey, showed a marked deterioration of the water quality, associate to the conjugation of factors as the antropogenic influence and the por removal of water.

Keywords: nutrients, eutrophication water quality, pollution.

INTRODUCCIÓN

Las áreas costeras son las zonas de mayor desarrollo en todo el planeta, estas son fuentes de muchos recursos valiosos, que permiten desarrollar pesquerías comerciales y recreacionales, extensas áreas de agua la natación y navegación, y uso del agua en procesos de enfriamiento y reducción de la concentración de contaminantes en los puntos de descarga de las aguas residuales domésticas e industriales [1].

La eutroficación es el incremento de la tasa de producción de materia orgánica en un cuerpo de agua, asociado al sobre enriquecimiento de nutrientes [2-4]. Los cambios climáticos afectaran la eutroficación de los estuarios y la zona costera, incrementado los flujos de nutrientes, las relaciones entre nutrientes, la producción fitoplanctónica, el desarrollo de algas tóxicas y nocivas, la reducción de la calidad del agua, pérdida de los hábitad y recursos naturales, y el recrudescimiento de la hipoxia [5-6].

El manejo costero se beneficia con el conocimiento y la modelación de los procesos de eutroficación, a partir de parámetros ambientales como la temperatura, turbidez, fósforo total, nitrito, amonio, demanda bioquímica de oxígeno DBO, demanda química de oxígeno DQO, oxígeno disuelto y la clorofila "a", permiten predecir el nivel de florecimiento de algas [7-8]. El empleo de satélites es de gran utilidad para el monitoreo de la eutroficación en áreas costeras, los principales parámetros relacionados con la eutroficación, medidos a través de los mismos son la concentración de clorofila "a", temperatura superficial del mar, índice de turbidez, radiación activa fotosintética, radiación normalizada para la vida acuática, circulación oceánica, regimenes de marea y nivel del mar, y velocidad y dirección del viento en la superficie del mar [9]. La modelación de la calidad del agua costera de lenta remoción, también puede realizarse a partir de un modelo empírico

ortogonal que usa los parámetros demanda química de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total [10]. Del mismo modo se puede calcular el estado del índice de eutroficación a partir de la demanda química de oxígeno, el nitrógeno inorgánico disuelto y el fósforo inorgánico disuelto [11]. Mediante un modelo tridimensional se logra simular la calidad del agua y la eutroficación, a partir de las variaciones espacio-temporal de oxígeno disuelto, plancton y las descargas atmosféricas de nutrientes [12].

El índice de eutroficación por nutrientes propuestos por [13], establece los diferentes niveles tróficos para aguas costeras en base a compuestos inorgánicos de nitrógeno, fósforo y silicio [14] concluyó que el índice puede diferenciar los cambios en los niveles de nutrientes, siendo sólo sensible para determinadas concentraciones de nutrientes y no resulta apropiado para aguas cálidas. No obstante, dicho índice se ha usado para establecer el grado de eutroficación de lagunas costeras, estuarios y algunas zonas de la plataforma marina cubana [15-17]. Hay otros índices de eutroficación que emplean la DQO, nitrógeno inorgánico disuelto y fósforo inorgánico disuelto [18-19].

Aspectos relacionados con la hidroquímica, calidad de las aguas y contaminación de los sedimentos del Archipiélago Sabana-Camagüey (ASC), indicaron que los diferentes cuerpos de agua que lo conforman se caracterizaron por un bajo contenido de nutrientes, las concentraciones de estos aumentaron hacia la zona exterior a la cayería, también se señalaron altas salinidades en las zonas de menor remoción de las aguas y tendencia a la saturación de oxígeno [20- 22]. En las bahías de Cárdenas, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, De Perros y Nuevitas algunos de los indicadores químicos de la calidad de las aguas y sedimentos fueron típicos de cuerpos de aguas contaminados, como consecuencia del vertimiento de aguas residuales u otras actividades entrópicas, manifestándose la hipoxia en algunos sectores de Puerto de Sagua la Grande y Buenavista [23-31].

El objetivo de este trabajo fue determinar el estado trófico y la calidad del agua en algunas de las bahías que conforman la macrolaguna del ASC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Archipiélago Sabana-Camagüey (ASC), se localiza entre los 21°25' y 23°20' latitud N 77°00' y 81°30' longitud W , la extensión del mismo es aproximadamente 465 km. Entre Punta de Hicacos y la Bahía de Nuevitas, es la mayor de las cuatro regiones de plataforma marina de nuestro país. Consta de 2 515 cayos e islotes distribuidos fundamentalmente en el borde de la plataforma, este cordón suele limitar la libre comunicación con el océano abierto, y a su vez subdivide el cuerpo de agua en bahías de escasa profundidad [32] (ver figura).

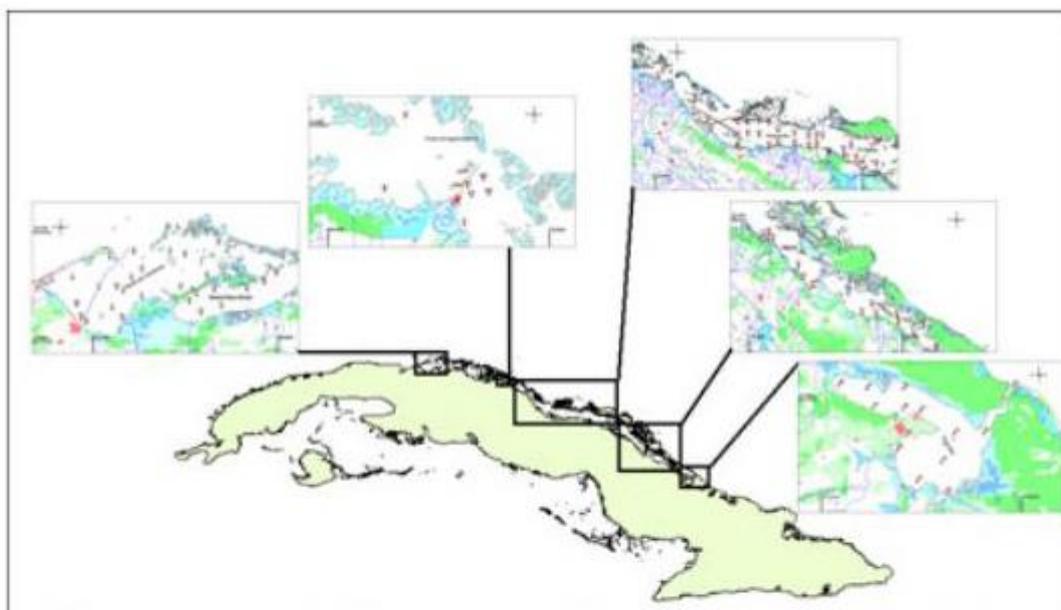


Fig. Red de puntos de muestreo en las bahías Cárdenas, Santa Clara Oeste, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, De Perros, Jigüey, La Gloria y Nuevitás.

Entre los años 2001 y 2011 se muestrearon las bahías del Archipiélago Sabana Camagüey, Cárdenas, Santa Clara Oeste (SCO), Puerto de Sagua la Grande (PSG), San Juan de los Remedios (SJR), Buenavista, De Perros, Jigüey, La Gloria y Nuevitás. La red de puntos de muestreo empleadas en las campañas oceanográficas se establecieron teniendo en cuenta el intercambio entre las bahías y el mar abierto, la red hidrográfica del ASC, la influencia antropogénica y el impacto ecológico sobre los hábitat de pastos marinos y manglares, esta se representa en la figura.

Las muestras de agua se tomaron en el nivel de superficie con una botella Nansen desde la embarcación y en puntos de escasa profundidad de forma manual [33]. En los muestreos se evaluaron in situ los parámetros hidrológicos temperatura con un termómetro de sensibilidad 0,1 °C, salinidad con un refractómetro de sensibilidad 1 ups y un sensor de sensibilidad 0,1 ups, el oxígeno disuelto **OD** con un oxímetro de sensibilidad 0,01 mg; en los puntos en que la salinidad fue > 45 ups se usó el método de Winkler [34] y la demanda bioquímica de oxígeno **DBO₅**, según la norma [35]. Para los restantes parámetros las muestras de agua se depositaron en frascos plásticos de capacidad 1 L, estas permanecieron en congelación hasta ser procesadas en el laboratorio de Química del Instituto de Oceanología, donde se determinó la demanda química de oxígeno **DQO** por oxidación de la materia orgánica con permanganato de potasio en medio alcalino [36], nitratos más nitrito **NO_x**, mediante la reducción de los nitratos a nitrito con Cd y con sulfato de hidracina, y posterior determinación como nitrito [36, 37], amonio **NH₄** de acuerdo al procedimiento analítico indicado por [36], nitrógeno total **NT** por oxidación de las formas reducidas de nitrógeno a nitratos con persulfato de potasio en medio alcalino [36], y fósforo inorgánico **PO₄** y total **PT**, según los procedimientos analíticos propuestos por [36]. La concentración de clorofila "a" se calculó a partir del algoritmo que relaciona la clorofila "a" con el NT [38].

Se determinó el grado de eutroficación de las bahías, a partir del índice de nutrientes **IN**, usando los parámetros demanda química de oxígeno DQO, nitrógeno total, fósforo total y clorofila "a" [39].

$$IN = (C_{DQO} / N_{DQO}) + (C_{NT} / N_{NT}) + (C_{PT} / N_{PT}) + (C_{Clro"a"} / N_{Clro"a"})$$

donde:

C_{DQO} , C_{NT} , C_{PT} y $C_{Clro"a"}$ son las concentraciones puntuales de DQO, NT, PT (en $mg \cdot L^{-1}$) y clorofila "a" en $\mu g \cdot L^{-1}$, y N_{DQO} , N_{NT} , N_{PT} y $N_{Clro"a"}$ son las concentraciones normalizadas o umbrales para agua de mar eutrofizada, DQO ($3 mg \cdot L^{-1}$), NT ($0,5 mg \cdot L^{-1}$), PT ($0,03 mg \cdot L^{-1}$) y Clro "a" ($10 \mu g \cdot L^{-1}$), según [39].

Se estimó el índice de calidad del agua según el Concilio Canadiense de Ministerios de Ambiente por sus siglas en inglés CCMEWQI [40], a partir de las concentraciones de OD, DBO_5 , DQO, NT y PT, las concentraciones normalizadas o umbrales de contaminación, para agua de mar se tomaron de la Norma cubana [41] OD ($5 mg \cdot L^{-1}$) y DBO_5 ($2 mg \cdot L^{-1}$), y DQO, NT y PT [39].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El régimen de salinidad en las bahías fue desde un medio mixosalino hasta hipersalino en las bahías De Perros, Jigüey y La Gloria. No obstante, en las restantes bahías, excepto en Puerto de Sagua la Grande (PSG), se midieron valores puntuales mayores a 40 ups (tabla 1). La hipersalinidad se asocia al desbalance entre las precipitaciones y la tasa de evaporación, al represamiento de los ríos que desembocan en la región, unido a la afectación de la circulación del agua en las bahías San Juan de los Remedios (SJR) y De Perros debido a los pedraplenes construidos que unen la isla de Cuba con Cayo Santa María y Cayo Coco, y el existente entre este último cayo y Cayo Guillermo.

Las concentraciones puntuales de oxígeno disuelto en las bahías fueron superiores a $5 mg \cdot L^{-1}$, excepto en PSG y en la zona marina del Parque Nacional Caguanes en la bahía Buenavista, donde hubo un mínimos de $4,98 mg \cdot L^{-1}$ y $1,05 mg \cdot L^{-1}$. La tendencia a la sobresaturación de oxígeno fue algo común en los cuerpos de agua, aunque en PSG y en la ensenada Carbó y la desembocadura del río Guaní en la bahía de Buenavista, predominaron las subsaturaciones, vinculadas a la materia orgánica acarreada por los ríos Sagua la Grande y Guaní y una fábrica de levadura torula. Los ríos antes citados están muy contaminados por materia orgánica [30] y [42].

En las bahía SCO y Nuevitas, los valores medios de la $DBO_5 < 1 mg \cdot L^{-1}$ (tabla 1). Los altos montos del parámetro en las bahías Cárdenas, PSG, SJR, Buenavista, De Perros y Jigüey, clasificaron a dichos sistemas de calidad dudosa y mala para uso pesquero, de acuerdo a [41]. Las concentraciones medias de la DQO fueron $> 2 mg/L$ (tabla 1), cuando la DQO en agua de mar supera la cifra antes señalada, la misma está contaminada por materia orgánica [43]. No obstante, en las bahías de ASC, resultan normales valores del parámetro $> 3 mg/L$, asociados a una alta producción primaria del fitoplancton y el fitobento, y a la materia orgánica de origen antropogénico [27-30].

Tabla 1

Concentraciones promedio, desviación estándar (DE), mínimos (Mín) y máximos (Máx) de salinidad S, oxígeno disuelto OD, demanda bioquímica de oxígeno DBO_5 y demanda química de oxígeno DQO, en las aguas de las bahías estudiadas

Bahía		S. ups	OD $mg \cdot L^{-1}$	SO %	DBO_5	DQO $mg \cdot L^{-1}$
Cárdenas	Promedio	37.35	7.03	117.3	1.73	2.95

	DE	1.33	1.27	21.4	1.27	1.55
	Mín.	34.90	5.69	96.3	0.55	1.15
	Máx.	40.06	11.60	188.8	5.18	6.05
SCO	Promedio	38.78	6.33	104.8	0.75	2.63
	DE	1.09	0.88	13.0	0.59	1.61
	Mín.	36.70	5.15	87.8	0.22	0.70
	Máx.	40.63	8.21	135.3	2.56	5.62
PSG	Promedio	33.04	5.66	94.8	2.76	3.33
	DE	1.22	0.35	6.0	1.68	1.60
	Mín.	30.50	4.98	82.6	1.12	1.82
	Máx.	35.00	6.28	105.2	6.66	6.66
SJR	Promedio	40.2	6.38	111.4	1.55	2.54
	DE	3.2	0.27	4.1	0.87	1.20
	Mín.	33.8	5.98	106.3	0.57	1.22
Buenavista	Promedio	39.8	6.34	107.8	2.43	4.00
	DE	2.8	1.41	25.2	1.76	4.77
	Mín.	30.8	1.05	16.9	0.44	0.44
	Máx.	44.9	8.52	151.9	9.34	29.30
De Perros	Promedio	65.25	6.40	134.7	3.21	5.24
	DE	13.61	1.19	35.1	3.40	2.93
	Mín.	47.00	4.83	100.0	0.30	2.00
	Máx.	88.80	9.81	206.6	11.50	11.50
Jigüey	Promedio	69.39	6.18	128.8	1.94	6.17
	DE	13.25	0.93	20.9	0.99	1.97
	Mín.	41.00	5.00	86.29	0.69	1.58
	Máx.	95.00	9.08	187.9	4.00	9.61
La Gloria	Promedio	45.05	7.01	120.9	1.36	2.74
	DE	4.43	0.69	12.5	1.13	1.12
	Mín.	38.91	6.16	103.8	0.10	0.85
	Máx.	54.80	8.92	155.8	3.63	5.12
Nuevitas	Promedio	37.1	6.74	112.6	0.84	2.19
	DE	2.2	0.94	15.3	0.47	0.89
	Mín.	32.5	4.70	80.2	0.06	0.88
	Máx.	40.0	8.62	144.7	2.10	4.48

De los compuestos de nitrógeno inorgánico el amonio fue el más abundante, las mayores concentraciones se encontraron en las bahías De Perros, Jigüey y La Gloria (tabla 2), estas coincidieron con los mayores valores de salinidad, y superaron el valor fijado por la [41], para que un cuerpo de agua marina sea de mala calidad para uso pesquero. No obstante, en ambientes hipersalinos son normales las elevadas concentraciones de este compuesto, debido a que a medida que aumenta la salinidad se ve favorecida la amonificación respecto a la nitrificación. Una elevada salinidad, asociada con largos tiempos de la residencia de las aguas, puede aumentar los procesos de reducción de los nitratos a amonio, y las altas

concentraciones del compuesto son usuales debido a la alta tasa de liberación desde los sedimentos, lo que traería aparejado una disminución de pérdida neta de nitrógeno [44-45] En lagunas costeras hipersalinas de Tunas de Zaza, el amonio conformó entre el 70 y 90 % del NTI y alcanzó concentraciones cercanas a $20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ [16].

Tabla 2

Concentraciones, promedio, desviación estándar (DE), mínimos (Mín.) y máximos (Máx.) de nitratos más nitrito NO_x, amonio NH₄, nitrógeno total NT, fósforo inorgánico PO₄ y fósforo total PT, en las aguas de las bahías Cárdenas, Santa Clara Oeste, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, De Perros, Jigüey y La Gloria.

Bahía		NO _x μmol·L ⁻¹	NH ₄ μmol·L ⁻¹	NT μmol·L ⁻¹	PO ₄ μmol·L ⁻¹	PT μmol·L ⁻¹
Cárdenas	Promedio	0,94	1,22	36,90	0,10	0,46
	DE	0,75	0,66	22,02	0,06	0,23
	Mín.	0,10	0,29	8,36	<0,03	0,14
	Máx.	3,57	3,42	125,65	0,24	1,00
SCO	Promedio	0,88	1,61	22,50	0,10	0,44
	DE	0,56	0,87	12,50	0,05	0,27
	Mín.	0,05	0,33	3,17	<0,03	0,03
	Máx.	2,17	3,76	51,08	0,26	1,10
PSG	Promedio	0,58	1,48	35,84	0,05	0,87
	DE	0,35	0,55	13,77	0,05	0,18
	Mín.	0,18	0,67	25,34	0,03	0,70
	Máx.	1,18	2,43	72,90	0,15	1,23
SJR	Promedio	0,46	0,91	33,29	0,15	1,03
	DE	0,16	0,14	7,55	0,11	0,52
	Mín.	0,19	0,68	19,18	0,04	0,58
	Máx.	0,66	1,09	41,61	0,32	2,13
Buenavista	Promedio	1,42	5,31	77,57	0,56	1,73
	DE	1,20	5,21	76,04	1,61	2,40
	Mín.	0,12	0,44	3,81	<0,03	0,10
	Máx.	4,68	20,32	310,45	8,88	12,01
De Perros	Promedio	1,40	4,30	83,82	0,12	0,73
	DE	1,00	2,14	47,06	0,09	0,25
	Mín.	0,06	1,90	17,73	<0,03	0,40
	Máx.	3,33	9,13	181,54	0,33	1,18
Jigüey	Promedio	0,92	3,87	64,61	0,22	1,16
	DE	1,01	3,66	5,08	0,02	0,11
	Mín.	0,13	0,17	64,78	0,19	0,99
	Máx.	4,70	18,51	41,70	0,18	0,99
La Gloria	Promedio	0,38	2,90	29,61	0,16	0,49
	DE	0,45	2,04	23,34	0,16	0,32
	Mín.	0,05	0,05	7,42	0,03	0,15
	Máx.	1,87	8,13	112,62	0,65	1,23
Nuevitas	Promedio	1,49	1,52	33,98	0,17	0,61
	DE	2,44	1,13	20,99	0,11	0,31
	Mín.	0,07	0,20	2,89	<0,03	0,19
	Máx.	11,54	5,23	90,38	0,58	2,05

Los nitratos más nitrito NO_x, tuvieron una distribución espacio temporal muy poco homogénea en las bahías, las mayores concentraciones se encontraron en las bahías Buenavista, De Perros, Jigüey y Nuevitas (tabla 2).

El nitrógeno orgánico conformó más de 80 % del nitrógeno total (NT). Las mayores concentraciones de NT se encontraron en las bahías Buenavista, De Perros y Jigüey (tabla 2), estas se asocian a una alta tasa de biosíntesis de materia orgánica, unida a una baja tasa de remoción de las aguas, algo que favorece la acumulación de nitrógeno y otros compuestos. En las bahías Cárdenas, PSG, SJR y Nuevitas los contenidos de NT, no fueron tan elevados, aunque estuvieron influenciados por las actividades antropogénicas.

Las concentraciones promedio de fósforinorgánico en las bahías fueron inferiores a $0,20\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, y mostraron una gran variabilidad (tabla 2). El fósforo total (PT) fue más abundante en las bahías Buenavista, De Perros y Jigüey, con concentraciones medias mayores a la unidad. En los casos de PSG y SJR las concentraciones medias fueron $> 0,50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ y en Cárdenas y SCO fueron muy cercanas a esta cifra (tabla 2). Aunque, en estas dos últimas en las áreas con cobertura de pastos marinos los valores puntuales fueron superiores a $1\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

El fósforo inorgánico resultó limitante para los productores primarios en la mayoría de la bahías, excepto en PSG y SJR, aunque los valores de la relación entre el NT y el PT, denotaron que en los cuerpos de aguas interiores del Archipiélago Sabana-Camagüey, el fósforo fue limitante para los productores primarios [46] y [47]. Los contenidos de fósforo fueron inferiores a los reportados para otras zonas de la plataforma marina cubana, donde el desarrollo de la red hidrográfica es mayor, ya que la principal entrada de fósforo al ambiente marino es a través de los ríos [48-50].

El índice de nutrientes arrojó que las bahías Buenavista, De Perros y Jigüey, cayeron en la categoría de cuerpos de agua marina eutrofizados, en las restantes bahías objeto de estudio los valores fueron < 4 (tabla 3), típicos de agua quemarina no eutrofizada.

Tabla 3

Valores del índice de nutrientes en las bahías objeto de estudio, de acuerdo a la metodología propuesta por Lin, 1996. (P.N.C., área marina del Parque Nacional Caguananes de la bahía Buenavista)

Bahía	Oligo-Mesotrófica 0-4	Eutrófica >4
Cárdenas	2.6	
Santa Clara Oeste	2.2	
Puerto de Sagua la Grande	2.9	
San Juan de los Remedios	3.3	
Buenavista P.N.C.		11.0
Buenavista		4.5
De Perros		5.4
Jigüey		7.5
La Gloria	2.6	
Nuevitas	2.9	

La eutrofización en las bahías Buenavista, De Perros y Jigüey, se asocia al vertimiento de aguas residuales crudas en la zona costera en el primer caso, unido a una baja tasa de remoción del agua. En las bahías De Perros y Jigüey, no hay fuentes de contaminación puntuales importantes, pero la presencia de viales sobre

el mar limitan la circulación del agua en las bahías, unido a la obstrucción de los canales hacen posible que el tiempo de residencia de las agua en las bahías sea alto, favoreciendo la acumulación de compuestos de carbono, nitrógeno y fósforo. Las bahías Cárdenas, PSG, SJR y Nuevitas son receptoras de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas, y en el caso de SJR hay un pedraplén una la ciudad de Caibarién con el cayo Santa María, pero estas bahías tienen menores períodos de residencia de las aguas [32], lo que limita la acumulación de materiales biógenos.

El enriquecimiento en nutrientes de las aguas costeras crea impactos primarios y secundarios como una alta producción de algas (clorofila), baja transparencia del agua y epifitismo, pérdida de biodiversidad, bajo contenido de oxígeno y florecimiento de algas nocivas y tóxicas [51]. La zona costera se puede contaminar seriamente por el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas [52]. En los sistemas costeros es probable que el nitrógeno sea la causa principal de la eutroficación [53] y [54]. Los factores que influyen la eutroficación y por tanto modifican la respuesta del sistema al incremento de las descargas de nutrientes, incluyen el tiempo de residencia hidráulico, las características del mezclado, la temperatura del agua, la iluminación y la presión de los herbívoros [55].

La aplicación del índice de calidad [40] a las bahías del ASC, dio resultados muy heterogéneos (tabla 4). La única bahía en que la calidad correspondió a la categoría de limpia fue SCO, donde de acuerdo a [40], la calidad del agua está frecuentemente protegida pero de forma ocasional pudiera perderse la calidad del agua o en algunas veces se deterioran las condiciones ambientales a partir de los niveles naturales o deseables. Este cuerpo de agua no está sometido a grandes impactos antropogénicos.

Tabla 4

Valores del índice de calidad de agua (CCMEWQI) y categoría, de las bahías Cárdenas, Santa Clara Oeste, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, De Perros, Jigüey, La Gloria, y Nuevitas (P.N.C., área marina del Parque Nacional Caguananes de la bahía Buenavista)

Bahía	Excelente 95-100	Buena 80-94	Limpia 65-79	Marginal 45-64	Pobre 0-44
Cárdenas				53	
Santa Clara Oeste			65		
Puerto de Sagua la Grande				50	
San Juan de los Remedios				64	
Buenavista P.N.C.					23
Buenavista				64	
De Perros					35
Jigüey				52	
La Gloria				55	
Nuevitas					42

En las bahías Cárdenas, PSG, SJR, Buenavista, Jigüey y La Gloria, las condiciones del agua correspondieron a la categoría de marginal. Según [40] la calidad del agua

está frecuente amenaza o hay un periódico deterioro de las condiciones ambientales.

En el caso de Cárdenas, la calidad se ve afectada por el vertimiento de aguas residuales no tratadas en la porción suroeste de la bahía, pero debido al gran volumen de la misma los contaminantes experimentan una gran dilución [24] y [42]. La bahía PSG es receptora de la carga contaminante transportada por el río Sagua la Grande, que es el más contaminado del ASC, dicho río acarrea residuales de las industrias sideromecánica y química, domésticos de la ciudad de igual nombre y del poblado Isabela de Sagua, situado en su desembocadura [56].

La bahía SJR ha estado sometida a fuertes impactos antropogénicos como el vertimiento directo sobre la zona costera de residuales domésticos, industriales y de la agricultura sin tratamiento; y del pedraplén que une la ciudad de Caibarién con Cayo Santa María [31] y [56].

En la bahía Buenavista, la pérdida de la calidad del agua se atribuye a las descargas de las fuentes contaminantes puntuales como los generados la industria azucarera, destilería de alcohol, fábrica de levadura torula y de la agricultura, transportados fundamentalmente por los ríos Guaní y Jatibonico del Norte [30] y [42].

En la bahía Jigüey, la alta residencia del agua permite la acumulación de compuestos carbono, nitrógeno y fósforo, siendo susceptible a la hipersalinización y la eutroficación [32] y [57]. Por último, La Gloria también es también hipersalina con un bajo número de fuentes de contaminación, aunque la baja tasa de renovación del agua permite la acumulación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo aspecto que atenta contra la calidad de la misma [32] y [58].

La calidad del agua fue pobre en el área marina del Parque Nacional Caguanes situado en la bahía de Buenavista, y en las bahías De Perros y Nuevitas, con pérdida total de la calidad del agua o con deterioro total de las condiciones ambientales a partir de los niveles naturales o deseables, de acuerdo a la descripción general del índice. En el área marina del Parque Nacional Caguanes se encontraron condiciones de hipoxia, así como elevadas concentraciones de amonio, nitrógeno orgánico y fósforo en agua [26]. Como se planteó en los párrafos relacionados con la eutroficación, la bahía De Perros, tiene un reducido número de fuentes contaminantes puntuales, pero está afectada por los pedraplenes que unen a Turiguanó con Cayo Coco y a este cayo, con Cayo Guillermo, que limita el intercambio con la bahía Jigüey y también con el mar abierto. En la bahía de Nuevitas en las zonas las situadas entre el río Saramaguacán y la ciudad Nuevitas, y la ubicada frente a puerto Tarafa, hay notables afectaciones de la calidad del agua y sedimento [59].

La bahía es receptora de residuales domésticos, industriales ricos en metales pesados, nitrógeno inorgánico y los generados por las actividades portuarias [42] y [59]. A pesar de la gran carga contaminante que recibe la bahía, la alta tasa de renovación del agua, impide la acumulación de contaminantes y la eutroficación del sistema. El estimado del período medio de renovación del agua es de 11 días [32].

CONCLUSIONES

El área marina del Parque Nacional Caguanes de la bahía de Buenavista, y las bahías De Perros y Jigüey están eutroficadas de acuerdo al índice de nutriente, aunque en las restantes bahías la tendencia a las sobresaturaciones de oxígeno, altos valores de DQO, notables concentraciones de NT y PT y bajas tasas de

renovación de sus aguas, siguieren que son susceptibles a que se desarrollen procesos de eutroficación.

La calidad del agua fue pobre o mala en el área marina del Parque Nacional Caguanes de la bahía de Buenavista y en las bahías De Perros y Nuevitas, cuerpos de agua sometidos a fuertes impactos antropogénicos. En los casos de las bahías Cárdenas, Puerto de Sagua la Grande, San Juan de los Remedios, Buenavista, Jigüey y La Gloria, la calidad del agua está muy comprometida, debido a las notables influencias antropogénicas en la mayoría de ellas, unido a bajas tasa de remoción del agua. En el caso de Santa Clara Oeste, los impactos antropogénicos no son tan notables, pero el alto tiempo de residencia del agua pudiera atentar contra la calidad del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. USEPA. Classification Framework for Coastal Systems. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency. 2004, p. 66.
2. NIXON, S. W. "Coastal marine eutrophication, a definition, social causes, and future concerns". *Ophelia*.1995, Vol. 41, p. 199-219.
3. USEPA. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual. Estuarine and Coastal Marine Waters. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2007, p. 1-13.
4. CAI, W. J.; HU, X.; HUANG, W. J.; MURRELL, M. C.; LEHRTER, J. C.; y otros. Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication. [Consultado, 15 de octubre de 2013]. Disponible en línea: <http://www.nature.com/naturegeoscience>
5. JUSTIC, D. , RABALAIS, N. N., TURNER, R. E. "Coupling between climate variability and coastal eutrophication, evidence and outlook for the northern Gulf of Mexico". *Journal of Sea Research*. 2005, Vol. 54, p. 25-35.
6. RABALAIS, N. N., TURNER, R. E., DIAZ R. J., JUSTIC, D. Global change and eutrophication of coastal waters. *International Council for the Exploration of the Sea*. Published by Oxford Journals. 2009,Vol. 66, p. 1528-1537 <http://icesjms.oxfordjournals.org/content/66/7/1528.full>
7. MELESSE, A. M., KRISHNASWAMY, J. ZHANG, K. "Modeling coastal eutrophication at Florida Bay using neural networks". *Journal of Coastal Research*. 2008, Vol. 24, p. 190-196.
8. ASCLME. National Marine Ecosystem Diagnostic Analysis. Mozambique. 2012, 64 p. <http://www.asclme.org/>
9. Northwest Pacific Action Plan Special Monitoring and Coastal Environmental Assessment Regional Activity Centre. 2007, [Consultado, 3 de junio de 2011]. Disponible en línea: <http://cearac.nowpap.org/>
10. UNO, K., TSUJIMOT, G., KAKIMOKI, T. Analysis of medium to long term variation of water quality in the Seto Inland Sea. Japan. 2009.ISBN 978-1-880653-52-1.

11. ZHEN, Z., QIULIAM, W. Research of water quality and pollution sources of Tainjin Offshore Area.[Consultado, 3 de junio de 2011]. Disponible en línea: <http://www.seiofbluemountain.com/search/detail.php> 2009, p. 65-70.
- 12.SUNDARAMBAL, P. TKALICH, P., BALASUBRAMANIAN, R. "Impact of biomass burning on surface water quality in Southeast Asia through atmospheric deposition, eutrophication modelling". Atmospheric Chemistry and Physics Discussions.2010, Vol. 10, p. 779-7818
- 13.KARYDIS, M., IGNATIADES, L., MOSCHOPOULOU, N. "Index associated with nutrient eutrophication in the marine environment". Estuarine, Coastal and Shelf Science.1983, Vol. 16, p. 339-344
14. KARYDIS, M. "Eutrophication assessment of coastal water based on indicators, a literature review". Global NEST Journal.2009, Vol.11, p. 373-390
15. PERIGÓ, E., A. MONTALVO, J. F., GARCÍA, I."Impacto ambiental en ecosistemas litorales del sur de la provincia de Sancti Spiritus (Cuba)". Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. 1999, V Taller de la Cátedra de Medio Ambiente. ISSN 959-7136-09-0
16. MONTALVO, J. F., PERIGÓ, E. "Compuestos de nitrógeno y fósforo y grado de eutrofización en lagunas costeras de Tunas de Zaza, Cuba". Contribución a la Educación y la Protección Ambiental.2000, Vol.1, p. 60 -64. VI Taller de la Cátedra de Medio Ambiente. ISSN 959-7136-09-0
17. BETANZOS VEGA, A., GARCÉS RODRÍGUEZ, Y., DELGADO MIRANDA, G., PIS RAMÍREZ, M. A. "Variaciones espacio-temporales de nutrientes y grado de eutrofización en aguas de los golfos de Ana María y Guacanayabo, Cuba". Revistas de Ciencias Marinas y Costeras. 2012, Vol.4, p. 117-130
18. ZOU, J., DONG, L., QIN, B. "Preliminary studies on eutrophication and red tide problems in Bohai Bay". Hydrobiologia. 1985, Vol.127, p. 27-30.
- 19.OKAICHI, T. Red Tides. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, Japan OzCoasts Coastal indicators, Coastal eutrophication. [Consultado, 23 de octubre de 2008]. Disponible en línea: <http://www.ozcoasts.gov.au/> 2004.
20. LLUIS-RIERA, M. Condiciones hidrológicas de la plataforma nororiental de Cuba, durante febrero de 1976. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, Julio de 1981. 1981, p. 32.
- 21.LLUIS-RIERA, M. Estudios hidrológicos de la plataforma nororiental de Cuba (Zona D). Editorial Academia, 1984.
22. PENIÉ-RODRÍGUEZ, I., GARCÍA-RAMIL, I.Hidroquímica y calidad ambiental del archipiélago Sabana-Camagüey. 1998, p. 155-159. IV Taller de la Cátedra de Medio Ambiente. ISSN 959-7136-09-0
23. ARENCIBIA, G., CARRODEGUAS, C., ROMERO, T. "Contaminación por metales pesados en los sedimentos de la Bahía de Cárdenas". Ciencias Marinas. 1992, 18, p. 167-180

24. REGADERA, R., BELTRÁN, J., SOLAR, F., RAMÍREZ, M., MANCEBO, H. Calidad del ecosistema marino de la zona Varadero-Cárdenas. 2002, Vol. 3, ISBN 959-7136-13-9
25. MONTALVO, J. F., GARCÍA, I., PERIGÓ, E., MARTÍNEZ, M., CANO, M. "Niveles más representativos de los parámetros de calidad químico ambiental en la ecorregión SabanaCamagüey". 2004. 5,58-70, X Taller de la Cátedra de Medio Ambiente ISBN 959-7136-24-4
26. HERNÁNDEZ, I., PERIGÓ, E., CANO, M. et al. "Calidad química de las aguas del sector sur central de la bahía de Buenavista, Sancti Spiritus, Cuba". Revista cubana de investigaciones pesqueras. 2004, Número especial 1. ISBN CUB0138-8452.
27. GARCÍA, I., LOZA, S., ESPONDA, S. C., CÉSAR, M. E., GONZÁLEZ DE ZAYA, R., HERNÁNDEZ, I. et al. "Oxígeno disuelto y materia orgánica en cuerpos de aguas interiores del Archipiélago Sabana-Camagüey, Cuba". Serie Oceanológica. 2008, Vol. 4, p. 71-84
28. GARCÍA, I. DE LOS A., PERIGÓ, E., ALBURQUERQUE, O. C., LÓPEZ, D., BETANZOS, A. DE J., ALMEIDA, M., GARCÍA, N. et al. "Calidad química del agua y sedimento en las bahías de Archipiélago Sabana-Camagüey". Revista Cubana de Química. 2013, Vol. 25, p. 123-133
29. BETANZOS, A., ARENCIBIA, G., DELGADO, G., NODAR, R. "Caracterización de la calidad del agua al norte de Villa Clara, Cuba, para definir zonas de cultivo del ostión de mangle (*Crassostrea rhizophorae*, guilding, 1828)". Revista de Ecotoxicología y Contaminación Ambiental. 2008, Vol. 1, p. 1-9
30. GARCÍA, N., PUENTES, O., MONTALVO, J. F. "Contaminación orgánica en el sector de la bahía de Buenavista cercano a la desembocadura del río Guaní, Villa Clara, Cuba". Revista Cubana de Química. 2008, Vol. 20, p. 39-45
31. PEDRAZA, J., MONTALVO, J. F., MARTÍNEZ, M., LEYVA, J. et al. "Evaluación preliminar de riesgos para la salud humana por metales pesados en las bahías de Buenavista y San Juan de los Remedios, Villa Clara, Cuba". Revista Cubana de Química. 2012, 24, p. 126-135
32. FERNÁNDEZ-VILA, L., CHIRINO, A. L. Atlas Oceanográfico de las aguas del Archipiélago Sabana - Camagüey. Instituto Cubano de Hidrografía. La Habana. 1993, p. 235.
33. ISO 5667-9. Water quality. Part-9 Guidance on sampling from marine waters. 1992
34. IOC-UNESCO. Chemical methods for use in marine environmental monitoring. Manual and guides, 1983, No. 12.
35. ISO 5815. Water quality. Determination of Biochemical Oxygen Demand alter 5 days (BOD₅)-Dilution and seeding method. 1989
36. VANN MELL, L. I. J. Les eaux saumâtres de Belgique. Approches progrès perspectives. Brussels, Belgique, Institut Royal du Sciences Naturelles de Belgique. 1982, p. 325.

37. FAO. "Manual of methods in aquatic environmental research part-1. Methods for detection and monitoring of water pollution". FAO Fish. Tech. Paper. 1975, p. 237.
38. NIELSEN, S. L., SAND-JENSEN, K., BORUM J., GEERTZ-HANSEN, O. "Phytoplankton, nutrients, and transparency in Danish coastal waters". Estuaries. 2002, p. 930-937.
39. LIN, R. "Review of assessing methods for coastal eutrophication". Marine Environmental Science. 1996, Vol. 15, p. 28-31.
40. CCMIEWQI. 2001. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
41. Norma Cubana-25. Sistema de normas para la protección del medio ambiente. Hidrosfera. Evaluación de objetos hídricos de uso pesquero. 1999.
42. PERIGÓ, E., MONTALVO, J. F., CANO, M., MARTÍNEZ, C., NIÉVARES, A., PÉREZ, D. M. Principales fuentes contaminantes en la ecorregión norcentral de Cuba (Archipiélago Sabana-Camagüey). Impactos y respuestas. 2004, Vol. 5, p. 14-26. ISBN 959-7136-24-4
43. EQS. Environmental Quality Standards for Water Pollution. 2002, <http://www.env.go.jp/en/lar/regulation/wp.html>
44. SOUZA, M. F. L., KJERFVE, B., KNOPPERS, B., LANDIM DE SOUZA, W. F., DAMASCENO, R. N. "Nutrient budgets and trophic state in a hypersaline coastal lagoon, Lagoa de Araruama, Brazil". Estuarine Coastal and Shelf Science. 2003, Vol. 57, p. 843-858.
45. COTNER, J. B., SUPLEEA, M. W., CHENA, N. W., SHORMANNB, D. E. "Nutrient, sulfur and carbon dynamics in a hypersaline lagoon". Estuarine Coastal and Shelf Science. 2004, Vol. 59, p. 639-652.
46. CARMENATE, M., SÁNCHEZ, M., CANTELAR, K., MONTALVO, J. F., GARCÍA, I., ESPONDA, S., HERNÁNDEZ, J. L., ESQUIVEL, M., LOZA, S. "Calidad ambiental de la bahía de Jigüey (NE de Cuba) y su relación con intoxicaciones alimentarias de origen marino". Serie Oceanológica. 2011, Vol. 9, p. 42-53.
47. MONTALVO, J. F., PERIGÓ, E., MARTÍNEZ, M., GARCÍA, I., ESPONDA, S. C., CESAR, M. E., GARCÍA, R., LÓPEZ, D., GARCÍA, N., LANCO, M. "Compuestos de nitrógeno y fósforo en las aguas superficiales de tres zonas de la plataforma marina cubana". 2010, Serie Oceanológica. No 7, p. 27-36.
48. LOSA, S., LUGIOYO, M., MARTÍNEZ, M., MIRAVET, M. E., MONTALVO, J., SÁNCHEZ, M. "Evaluación de la calidad de las aguas del Golfo de Batabanó a partir de indicadores biológicos y químicos". Rev. Invest. Mar. 2007, Vol. 28, p. 111-120.
49. MONTALVO, J. F., GARCÍA, I., LOZA, S., PERIGÓ, E., ESPONDA, S. C., SÁNCHEZ M., BARRIER, A. "Compuestos de nitrógeno y fósforo en agua de algunas bahías del Archipiélago Sabana-Camagüey, Cuba". 2010, <http://hol.handle.net/1834/3593>
50. BETANZOS-VEGA, A., SIAM-LAHERA, C., ARENCIBIA-CARBALLO, G. "Variación de la salinidad y su relación con la distribución por talla del ostión de mangle en

Villa Clara, Cuba". Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras. 2010, Vol. 25, p. 41-46.

51. BRICKER, S. B. Eutrophication assessment in coastal waters a decade of change. NJDEP HQ-Public Hearing Room, NJ. 2007, <http://www.eutro.org>

52. HOWARTH, R., CHAN, F., CONLEY, D. J., GARNIER, J., DONEY, S. C., MARINO, R., GILLES-BILLEN, G. "Coupled biogeochemical cycles, eutrophication and hypoxia in temperate estuaries and coastal marine ecosystems". Front Ecol Environ. 2011, Vol. 9, p. 18-26.

53. SANCHEZ, R. M., ZEA, S. "Metabolismo de nitrógeno y fósforo inorgánicos disueltos en la columna de agua en una laguna costera tropical (Caribe Colombiano)". Caribbean Journal of Science. 2000, 36, p.127-140.

54. HOWARTH, R. W., MARINO, R. "Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems, Evolving views over three decades". Limnology and Oceanography.2006, Vol.51, p. 364-376.

55. OzCoasts Coastal indicators: Coastal eutrophication. <http://www.ozcoasts.gov.au/>

56. MONTALVO-ESTÉVEZ, J. F., PERIGÓ-ARNAUD, E., MARTÍNEZ-CANALS, M. "La contaminación marina". Ecosistema Sabana-Camagüey. Estado actual, avances y desafíos en la protección y el uso sostenible de la biodiversidad. 2007. Editorial Academia. La Habana 2007. p. 79-83. ISBN: 978-959-270-093-2

57. LOSA, S. et al. "Flujos de materiales conservativos y no conservativos en la Bahía de Jigüey (Archipiélago Sabana-Camagüey, Cuba) y el océano". 2006, Serie Oceanológica. 2: p. 2-10

58. GARCÍA, I., ALMEIDA, M., ESPONDA, S. C. et al. "Flujos de agua, sal y materiales no conservativos en tres bahías (Cárdenas, Santa Clara Oeste y La Gloria) del Archipiélago SabanaCamagüey y el mar abierto". Serie Oceanológica. 2011 9:30-41

59. RUIZ, F., PÉREZ, A., GARCÍA, R., GONDÍ, O., VALDÉS, M., POTRILLE, F., SOLAR, F., PERILES, I., MARTÍN, A., RODRÍGUEZ, R., ALVAREZ, R., MANCEBO, H., HERNÁNDEZ, S., REGADERA, R., BELTRÁN, J., TORRES, I., PÉREZ, O., RAMIREZ, M. Diagnóstico de la calidad ambiental del ecosistema Bahía de Nuevitas. 2003, Informe parcial CIMAB.

Recibido: Junio 2014

Aprobado: Octubre 2014

MSc. José F. Montalvo. Instituto de Oceanología, Playa, Habana, Cuba.
montalvo@oceano.inf.cu