

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/324454320>

Evaluación de la calidad del agua en zonas costeras

Conference Paper · January 2000

CITATIONS

0

READS

1,419

2 authors, including:



Rodolfo Silva

Universidad Nacional Autónoma de México

707 PUBLICATIONS 4,318 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



CEMIE-Océano [View project](#)



Evaluation of Bio-Economic Risks due to Overexploitation of Aquifer Systems in an Arid Coastal Area (ECOQUA) [View project](#)

**XI Congreso Panamericano de Ingeniería Oceánica y Costera.
Evaluación de la calidad del agua en zonas costeras**

Juan Carlos Espinal González & Rodolfo Silva Casarín.

Instituto de Ingeniería UNAM, Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos.

Cd. Universitaria, Apdo. Postal 70-472, 04510 México D.F.

Email: jcarlos@litoral.iingen.unam.mx, rodo@litoral.iingen.unam.mx

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se aborda la importancia de la calidad del agua en zonas costeras en función de sus posibles usos. Se evalúan las ventajas y desventajas de los modelos matemáticos para el estudio del comportamiento de la dispersión de contaminantes, así como para la evaluación de la calidad de agua, por medio de la simulación de la concentración de OD y DBO.

La calidad del agua es un factor muy importante para el desarrollo de actividades en zonas costeras así como para la protección y conservación de espacios litorales. Se pueden clasificar cuatro tipos de usos de espacios litorales, estos son: recreativos, pesca y cultivos marinos, conservación de espacios litorales, e industriales.

A cada uno de estos espacios litorales se le asocia un objetivo de calidad de agua. En la evaluación de la calidad del agua costera es necesario realizar campañas de campo, para recabar información suficiente en cantidad y calidad, para alimentar los modelos matemáticos. Estos modelos deben ser capaces de simular la evolución de Oxígeno Disuelto (OD), o la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en un cuerpo de agua, ante el vertido de sustancias contaminantes.

Para ello deben considerar en la solución de su esquema numérico, además de factores como: la batimetría, viento dominante, marea, OD y DBO actuales del cuerpo de agua, salinidad, entre otros.

La variedad de modelos que cumplen este perfil es importante, sin embargo es necesario recalcar la necesidad de una buena calidad en la información hidrodinámica del área en estudio, ya que de no ser así cualquier esfuerzo por simular la evolución

de DBO u OD, será insuficiente para lograr los resultados que lleguen a cumplir con los objetivos de cualquier estudio.

Con la evaluación de la calidad de agua en zonas costeras se puede verificar y regular el cumplimiento de los objetivos de calidad, necesarios para la protección y conservación de las zonas costeras. Principalmente aquellas en presencia de actividades comerciales o industriales, que generen degradación del medio ambiente acuático, o incluso problemas de salud a la población.

ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS DE CALIDAD.

Zonificación de usos.

Se entiende por zona Litoral, el área comprendida entre la línea de costa y la zona de rompiente. Los espacios litorales se pueden clasificar en cuatro tipos, que servirán de guía para la definición de los usos particulares de cada área considerada.

El objetivo de esta clasificación es definir la calidad de agua requeridas para el desarrollo de las actividades que se realicen en esa área del Litoral además de conservar y proteger la flora y fauna típica de la zona. A continuación se describen los diferentes posibles tipos de usos de las aguas Litorales.

Recreativos

Se incluyen las actividades realizadas en el litoral que utilicen de forma directa o indirecta a las masas de agua consideradas, dentro de estas actividades podemos encontrar, el buceo, el windsurf, pesca deportiva, vela, etc.



Figura 1 El Marlin es una de las especies más gustadas en la pesca deportiva “Instituto Nacional de Ecología México.”.

Pesca y cultivos marinos.

En estas actividades se incluyen las actividades relacionadas con la extracción comercial de recursos pelágicos y bentónicos renovables (pesca y marisqueo), mantenimiento, reproducción y cría de especies marinas en instalaciones artificiales que utilicen espacio litoral como zona de abastecimiento de agua.

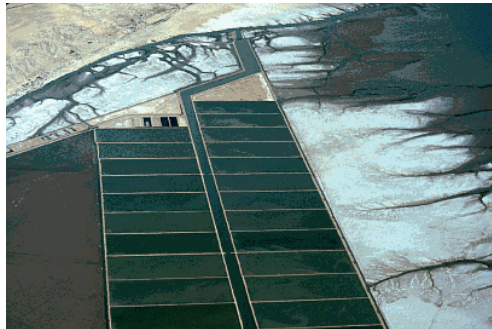


Figura 2 Cultivo de Camarón en el Golfo de California “www.semarnap.gob.mx”.

Conservación de espacios litorales.

Este uso genérico se refiere al mantenimiento de los valores estéticos, ecológicos, culturales, educativos o científicos propios de los espacios litorales. Este uso afecta a toda la gama de ecosistemas acuáticos englobados, cuyo límite con el medio continental vendrá impuesto por el área de influencia de la marea, y por lo tanto, implicará la existencia de zonas cuyas características hidrodinámicas, biológicas, ecológicas, etc., sean diferentes.



Figura 3 Biodiversidad Arrecife típico, Cancún Quintanarro, México “www.semarnap.gob.mx”.

Industriales

Estos abarcan las actividades usuales en el Litoral, todas aquellas que tengan que ver con él tráfico portuario definido como las operaciones de entrada, salida, atraque, desatraque, estancia y reparación de buques en puertos y las de transferencia de estos entre tierra y otros medios de transporte de mercancías de cualquier tipo, de pesca, de pasajeros o tripulantes, así como el almacenamiento temporal de dichas mercancías en el espacio portuario, siempre que se realicen dentro de los espacios acuáticos que estén dotados en el medio terrestre con las instalaciones necesarias para su desarrollo.



Figura 4 "ICAVE" Terminal de contenedores puerto de Veracruz, México, Puerto de Veracruz.

ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS DE CALIDAD

Una vez definido el uso de los espacios litorales, así como las actividades que se van a desarrollar dentro de sus aguas es necesario determinar los parámetros de calidad que cumplan ampliamente con los objetivos planteados para la actividad a desarrollar, puede pasar que mientras un requerimiento de calidad sea ampliamente satisfactorio para una actividad como la de un puerto comercial, es insuficiente para la conservación de un arrecife o en una granja de cría de camarón.

Una vez definidos los usos se establecen los objetivos de calidad asociados a cada una de las zonas, delimitadas en la zonificación, en la **Tabla 1** se especifican algunos de los posibles objetivos para cada tipo de uso genérico.

USO DEL LITORAL	OBJETIVO DE CALIDAD
Recreativo	El mantenimiento de una calidad del medio ambiente que evite el deterioro estético del ambiente y proteja la salud de los usuarios.
Pesca y Cultivos	Una calidad del medio que permita el desarrollo de los recursos marinos naturales, cultivados con la calidad requerida para su consumo.
Conservación de espacios Litorales	Una calidad del medio tal que proteja la flora y fauna típica.
Industriales	Una calidad del medio marino que evite el problema para el desarrollo normal de las actividades y proteja a esas zonas de un deterioro estético.

Tabla 1. Objetivos de calidad asociados a determinados usos del litoral. "Metodología de estudio de los Saneamientos Litorales Edición Base, Oviedo, Diciembre de 1995".

PROGRAMA DE VIGILANCIA Y CONTROL AMBIENTAL

El reconocimiento de los riesgos potenciales y de los cambios que "a priori" se podría llegar a manifestar en el medio litoral como consecuencia de los vertidos del Sistema de Saneamiento Litoral, no lleva implícita ni la consideración de su incompatibilidad con los usos de dicho medio ni un posible incumplimiento de los objetivos de calidad exigibles en las diferentes zonas delimitadas, por el contrario, representa la declaración de todos aquellos aspectos medioambientales sobre los que debe incidir el programa de Vigilancia.

El diseño técnico de los Programas de Vigilancia y Seguimiento está relacionado con el proceso de decisión sobre: ¿Que medir?, ¿Cómo?, ¿Cuándo?, ¿Donde?, hay que hacer las mediciones y cómo analizar, interpretar, sintetizar y presentar los datos obtenidos.

En la bibliografía especializada se han planteado esquemas de trabajo que facilitan la estandarización de todos los aspectos que se deben considerar en el diseño de los Programas de Vigilancia.

Del análisis y la conjugación de las distintas alternativas surge una metodología genérica del diseño **Figura 5** que se fundamenta básicamente en el modelo desarrollado por la National Academic of Sciences (NRC, 1990).

El objetivo de la Vigilancia es producir un tipo de informe que permita tomar las decisiones adecuadas para: Proteger al medio ambiente y sus recursos, además de asegurar que la salud humana no se vea amenazada y evitar la interferencia entre los distintos usos del medio, la aplicación de este objetivo genérico a una actuación concreta, como es el caso del diseño de un Sistema de Saneamiento Litoral, pasa por la realización de un análisis detallado que ponga en evidencia la posible problemática ambiental derivada de la puesta en marcha de la actividad proyectada.

Uno de los elementos básicos de gestión de la calidad adaptada en este estudio es el establecimiento de objetivos de calidad por cada uno de los usos reconocidos en el entorno del estudio.

Por lo tanto dichos objetivos genéricos representan un punto obligado en este análisis y posteriormente, para el enunciado de los objetivos de vigilancia.

No obstante la previsión inicial de impactos debe contemplar también otras situaciones, por extremas que se consideren, con el fin de reducir al máximo la posibilidad de aparición durante el seguimiento de efectos no adelantados.

Los objetivos deben integrar las preocupaciones de la población y las previsiones recogidas en el marco legal en vigor, a través del conocimiento científico aplicable, identificando y centrandó globalmente las cuestiones más relevantes que haya que resolver.

Este enfoque científico asegura, por una parte, que se tengan en cuenta las limitaciones conceptuales y técnicas existentes para la consecución de los objetivos y, por otra, que se realice una selección adecuada de éstos.

El objetivo global de la vigilancia es producir un tipo de información que permita tomar las decisiones adecuadas para cuidar el medio ambiente y sus recursos asegurar que la salud humana no se vea amenazada.

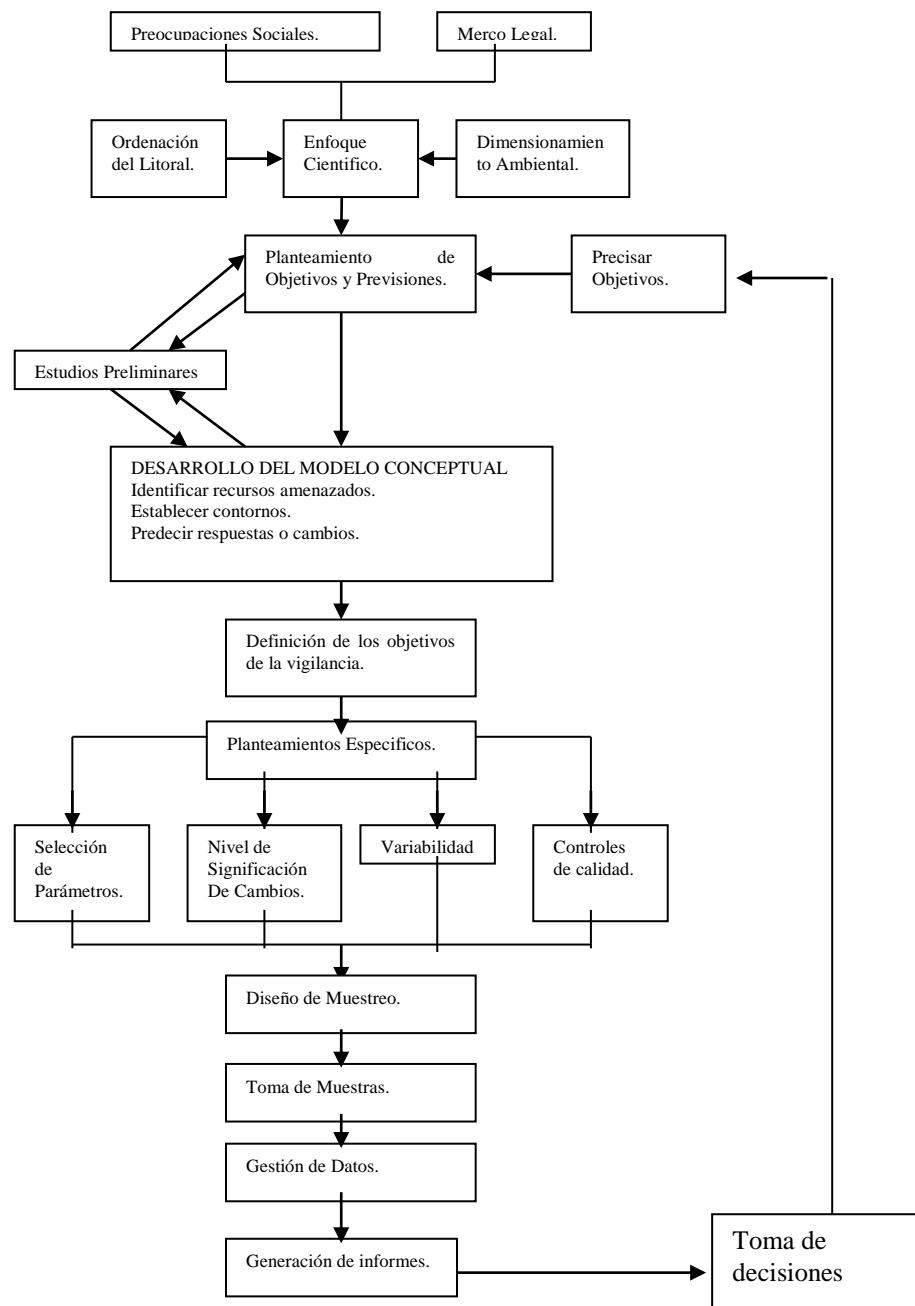


Figura 5. Esquema metodológico aplicable al desarrollo del Plan de Vigilancia y Control Ambiental. “Metodología de estudio de los Saneamientos Litorales Edición Base, Oviedo, Diciembre de 1995”.

MODELOS HIDRODINÁMICOS Y DE CALIDAD DE AGUA

Es importante plantear desde un principio que los modelos matemáticos no son la panacea en la solución a problemas que deben enfrentar los ingenieros y demás profesionales, al hacer la evaluación del impacto ambiental, de los diferentes agentes

que pueden provocar contaminación a un cuerpo de agua, por ello es importante conocer las hipótesis con las que fue formulado el modelo, con el objeto de establecer, sus alcances y limitaciones, dentro del diseño así como para poder elegir aquel modelo matemático, que se apegue mejor a las condiciones reales del escenario real que se está estudiando.

Modelos de calidad de agua

El problema de la reducción de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en las masas de aguas superficiales, originada principalmente por el vertido de sustancias contaminantes ha sido detectado y estudiado desde el principio de este siglo. Es importante hacer notar que bajas concentraciones del oxígeno disuelto producen desequilibrios en el ecosistema acuático, lo que se traduce en un aumento de la mortalidad entre los diferentes organismos, deterioro estético, aparición de olores, etc. Es válido y conveniente considerar la concentración de OD como un índice de salud general del ecosistema acuático.

El equilibrio en las concentraciones del oxígeno disuelto es producto de complejas interrelaciones de organismos que habitan en el medio acuático, las sustancias químicas presentes en él, los procesos biológicos que se desarrollan en un seno y sus condiciones físico-químicas. Este equilibrio puede ser alterado debido a cambios, más o menos bruscos, de cualquiera de los factores anteriormente mencionados, cambios que pueden tener su causa en fenómenos naturales o ser el resultado de la acción de la presencia y actividad humana.

Este planteamiento da a conocer la complejidad que se presenta al tratar de modelar las diferentes interrelaciones de los fenómenos que intervienen en la determinación del Oxígeno Disuelto, sin embargo se pueden llegar a modelos que tengan una buena estimación sobre las posibles variaciones en las concentraciones del OD debido a los procesos que a continuación se describen brevemente.

Existe una gran diversidad de modelos de calidad de agua que van, desde aproximaciones sencillas de parámetros concentrados, hasta modelos complejos cuya calibración requiere una gran cantidad de factores. De la misma forma, es reconocido que dichos parámetros son, indudablemente, el punto delicado de los modelos de

calidad del agua, ya que son factores que dependen fuertemente del cuerpo de agua específico que se pretende modelar. El resultado básico de un modelo de calidad de agua, lo constituye la evolución a lo largo del tiempo de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en el dominio del modelo o en puntos específicos del mismo.

Es muy recomendable que previo a la realización de análisis numéricos, se realicen campañas de campo in situ que permitan determinar con la mejor aproximación posible el mayor número de parámetros requeridos para la modelación, esto es con la finalidad de calibrar al modelo con la información más apegada a las condiciones reales del cuerpo de agua, sin embargo estas condiciones tienen una variabilidad a lo largo del tiempo y del espacio además se presentan de manera aleatoria, sin embargo puede llegar a calibrarse los modelos con condiciones extremas, ya que al utilizar estos modelos en la generación de escenarios, se deben tomar en consideración las condiciones más desfavorables que se pueden presentar, para poder dar alternativas viables desde el punto de vista ambiental, técnico y económico.

Modelos de Advección dispersión

Estos modelos tienen su fundamento en la ecuación de transporte de masa. La ecuación de conservación de la masa se formula en términos de velocidad y concentraciones instantáneas, a través de la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + \frac{\partial q}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{ec.1})$$

Donde c es la concentración instantánea de la sustancia, \mathbf{u} la velocidad instantánea, \mathbf{x} la coordenada cartesiana, $j=1,2,3$ - las tres direcciones de las coordenadas, q el flujo de masa($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). La ecuación (1) expresa el principio de los cambios locales y advectivos en la concentración, sumados al cambio de flujo de masa q , tiene una resultante nula, siempre y cuando no haya aportaciones de masa procedentes del exterior del dominio del modelo.

Para la integración de la ecuación (1) es conveniente expresar el flujo de masa en términos de la concentración de la sustancia. Esta relación viene dada por la ley de Fick cuya expresión es la siguiente:

$$q = -K \frac{\partial c}{\partial x_j} \quad (\text{ec.2})$$

Donde k es la constante de difusión molecular de Fick. La constante k es una propiedad del fluido, de la sustancia diluida en él y del estado termodinámico de la mezcla y su valor es conocido para los principales fluidos.

Modelos Hidrodinámicos.

Su objetivo es el cálculo de velocidades inducidas, por la acción del viento y la marea, parten de la ecuación de Navier-Stokes

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = \rho \mathbf{g} - \text{grad} p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \mu \text{grad} \text{div} \mathbf{v} \quad (\text{ec.3})$$

y de la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (\text{ec.4})$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, ρ la densidad del agua; μ la viscosidad dinámica; t el tiempo U , V y W las componentes de la velocidad en las direcciones x , y , z del plano cartesiano. Para las condiciones que se observan durante las descargas de aguas residuales en el litoral se puede tomar como hipótesis que habitualmente las velocidades transversales son muy pequeñas.

Esto se debe a que generalmente en estas zonas el flujo se genera normalmente por ondas cuya longitud (L) es mucho mayor que la profundidad del agua (H) como es el caso, por ejemplo, el de la marea. La condición de onda larga ($W \approx 0$), que se puede considerar aplicable a partir de $L > 20H$.

La integración de las ecuaciones de los modelos de advección, dispersión e hidrodinámicos pueden resolverse en dos o tres dimensiones, normalmente se lleva a cabo empleando el método implícito de dirección alternante (ADI), aunque existen

otros metodos como el de elemento finito. El pasar de una solución bidimensional a una cuasitridimensional o tridimensional, representa un aumento en las condiciones de frontera, en el grado de inestabilidad numérica, datos iniciales de los modelos, tiempo de computo, requerimiento de capacidad del equipo, etc. Otro punto importante en la utilización de modelos matemáticos, esta en la calibración, principalmente existen dos variables a calibrar, estas son: la viscosidad de remolino y la fricción de fondo. La variación del valor de uno y otro esta en función del área en estudio.

CASO DE APLICACIÓN: ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y DE CALIDAD DE AGUA DE LA LAGUNA DE NICHUPTÉ PARA 8 CONDICIONES A COMPARAR.

El propósito fundamental del estudio fue determinar y analizar cual de las alternativas estudiadas, es la que mejora en mayor medida la calidad de agua de la LB. La localización y evolución del OD y DBO de algunos de los escenarios simulados se muestran a continuación:

1. Condiciones actuales.
2. Dragando la zona norte de la LB.
3. Incorporando 3 aireadores a lo largo de la parte Este de la LB.
4. Incorporando 6 aireadores a lo largo de la parte Este de la LB.
5. Incorporando 9 aireadores a lo largo de la parte Este de la LB.
6. Bombeando agua de mar con un gasto de 0.5 metros cúbicos por segundo distribuidos en 7 puntos a lo largo de la parte Este de la LB.
7. Bombeando agua de mar con un gasto de 1.5 metros cúbicos por segundo distribuidos en 7 puntos a lo largo de la parte Este de la LB.
8. Bombeando agua de mar con un gasto de 1 metros cúbicos por segundo distribuidos en 7 puntos a lo largo de la parte este de la LB.

Condiciones de frontera hidrodinámicas

Por lo que a la parte hidrodinámica corresponde, se emplearán las siguientes condiciones de viento y marea promedio reportadas en el World Wave Atlas, 1995, OCEANOR:

- Onda reflejante

- Amplitud de onda promedio de 0.15 m
- Período de 12 h
- Desfase de 270grados.

La **Figura 6** indica de manera generica los estados de marea empleados:

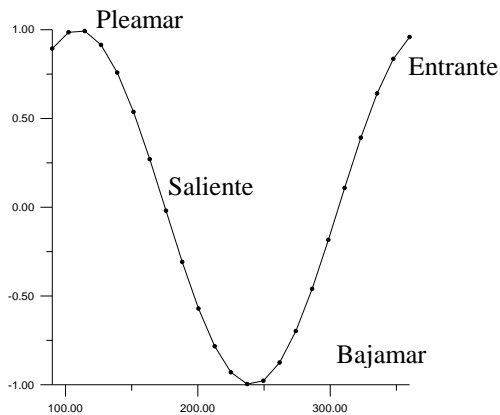


Figura 6

La condición de viento utilizada para la zona fue la velocidad promedio anual de 20 km/h con una dirección de 108° respecto al norte geográfico. La batimetría tanto del Sistema Laguar Nichupté y de la Laguna de Bojórquez empleada en todas las simulaciones, fue proporcionada por consultores s. a. de c. v. Los parámetros iniciales empleados en dicho modelo de calidad de agua, fueron tomados del informe “Hidrodinámica de la Laguna de Nichupté, Cancún, Q. Roo, México”, elaborado por el IMTA EN 1993. Debido a que la zona de estudio del ejemplo representa solo una pequeña parte del SLN, se realizo en dos etapas. La primera en la cual se simulo de manera global todo el SLN y la segunda que solo considera la zona tomada para el ejemplo. Para está última se emplearon como condiciones hidrodinámicas de frontera, las generadas durante la simulación de todo el sistema. El dominio de cálculo del SLN completo se representó con un total de 12584 nodos, con un total de 143 nodos en la dirección norte-sur y de 88 nodos en la dirección este-oeste (es decir se utilizo una malla de 143*88), con espaciamiento de 100 metros en cada una de las direcciones, el paso de tiempo empleado fue de 10 segundos, requiriéndose aproximadamente 132 horas de simulación para lograr condiciones estables de flujo. Para la zona de estudio en detalle se emplearon un total de 992 nodos, con un total de 32 nodos en dirección norte-sur y de 31 nodos dirección este-oeste con espaciamientos de 100m.

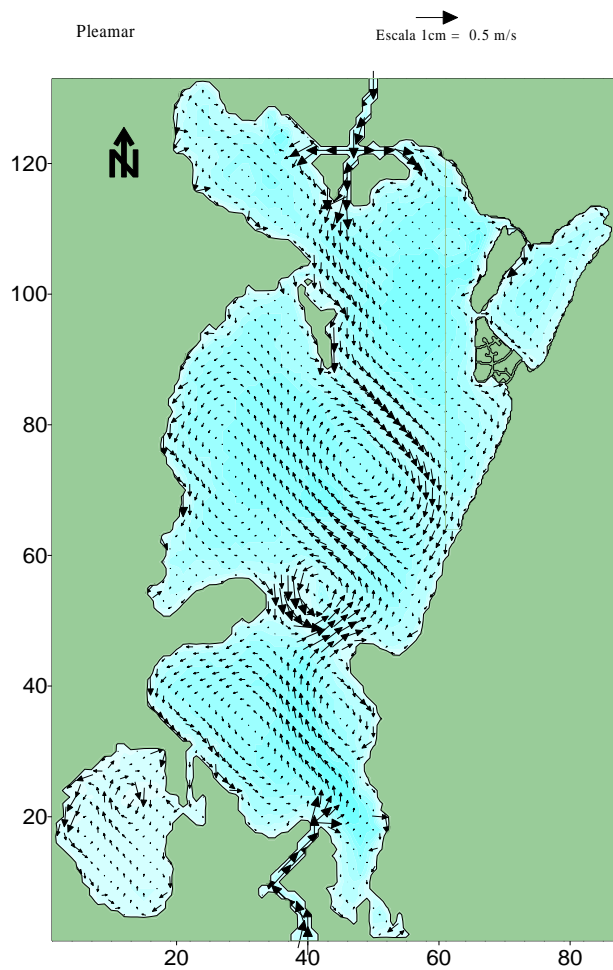


Figura 7. Patrón hidrodinámico “Estudio hidrodinámico y de calidad de agua de Nichupté. Influencia de un canal artificial” Instituto de Ingeniería UNAM, México, Octubre de 1998.

1º Bombeo puntual de agua de mar de 5 m³/s.

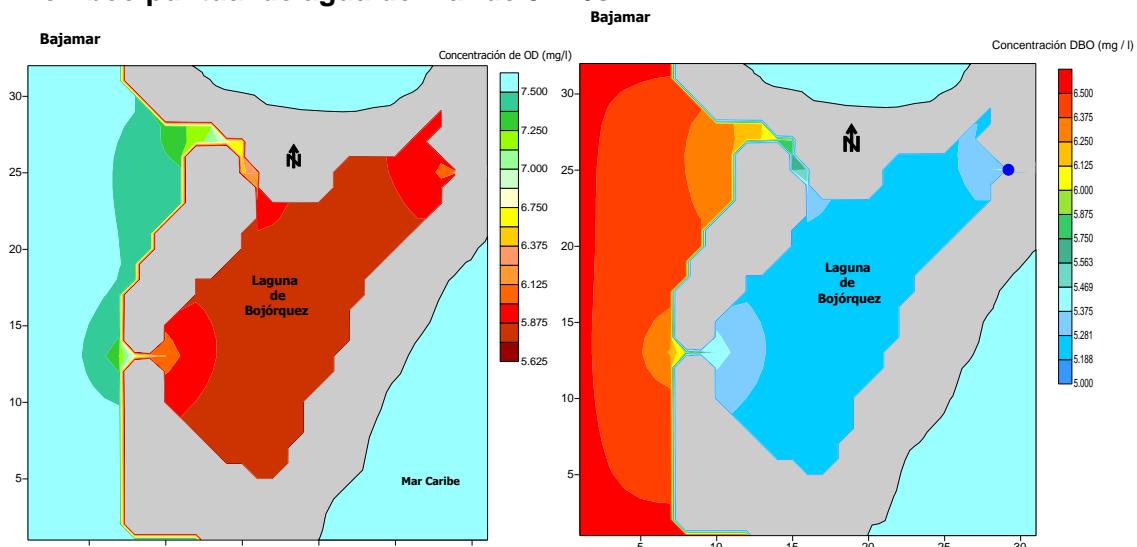
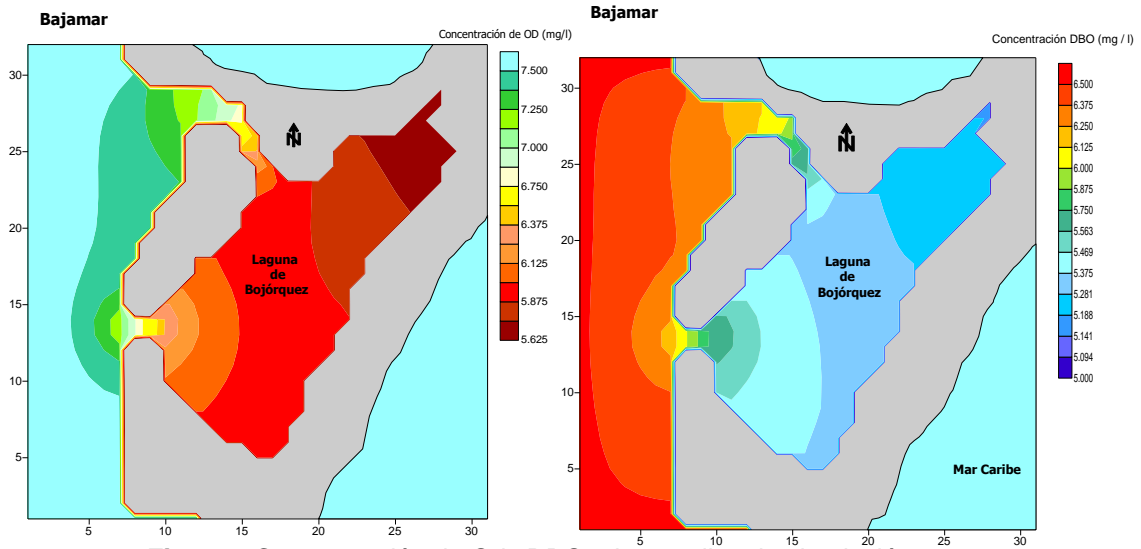
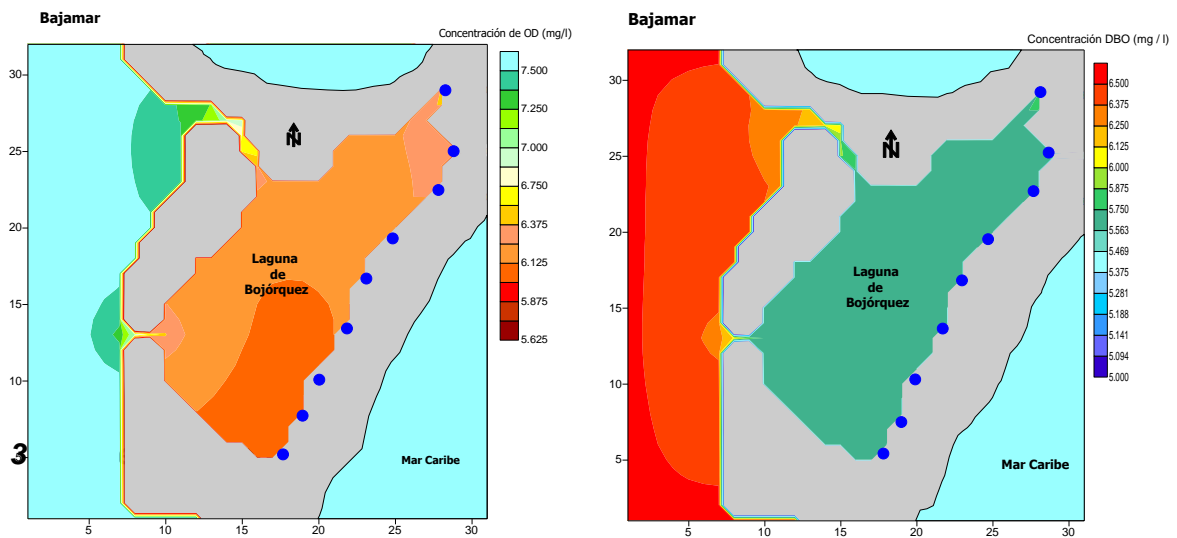


Figura 8 Concentración de Ody DBO a los 30 días de simulación

2º Dragado de las dos bocas



3º Nueve aeradores



Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se concluyó que los nueve aeradores es la alternativa más viable.

CONCLUSIONES

- Los modelos matemáticos son herramientas útiles en la evaluación de la calidad de agua en zonas costeras, sin embargo es necesario calibrar adecuadamente dichos modelos, además de conocer sus alcances y limitaciones, para llegar a una interpretación adecuada de los resultados obtenidos.
- Es más importante contar con buenos datos de velocidad, que con un modelo sofisticado de calidad de agua.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fischer, H.B.; list, F,J; KOH, R.C.Y; Imberger, J; Brooks, N.H; (1979); Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic press, inc. California (EE.UU).
2. Streeter/Wylie (1979), Mecánica de los fluidos, sexta edición.
3. Sánchez Bibriesca (197*),Mecánica de Fluidos. Instituto de Ingeniería U.N.A.M.
4. Huber, W.C. Dickinson, R.E; (1988); "Storm water management model. Version 4. User's Manual". Environmental protection agency. Athens (EE.UU).
5. Koutitas, C.G; (1988) "Mathematical models in coastal engineering". Pentech press limited. Londres.
6. Collign, j;(1991). "Ecologie et biologie marines. Introduction à l'halieutique". Masson. París (Francia).
7. Ambrose, R.B; Wool, T.A; Martin, J.L; Connolly, J.P; Schanz, R.W (1991); "Wasp5.x, a hydrodynamic and water quality Model-Model theory. User's manual and programmer's guide". Environmental protection agency. Athens. Georgia (EE.UU).
8. IMTA (1993) "Hidrodinámica de la Laguna de Nichupté, Cancún, Q. Roo México", Jiutepec, Morelos México.
9. Metcalf and Eddy (1995), Ingeniería de aguas residuales Tratamiento, vertido y reutilización. v1-2.
10. Baumgartner, D.J; Frick, W.E.; P.J. W;(1994); "Dilution models newport. Oregon (EE.UU).
11. Metodología de estudio de saneamientos litorales, edición base. Confederación Hidrográfica del norte. Oviedo, Diciembre de 1995.
12. USEPA(1997) Quality Criteria for water. Office of water and hazardous materials. United States Environmental protection agency. Washigton, D.C. 20460.
13. Borja (1997). La evaluación de impacto ambiental en el medio marino. IV Jornadas Españolas de ingeniería de puertos y costas. Cádiz, España.
14. Instituto de Ingeniería U.N.A.M. (Octubre 1998) Estudio hidrodinámico y de calidad del agua Laguna de Nichupté. Influencia de un canal artificial.
15. Uribe (2000). Caracterización del clima marítimo mexicano. Facultad de ingeniería, UNAM.
16. Espinal(1999).Metodología para el Diseño Integral de Sistemas de Saneamiento Litoral. Facultad de ingeniería, UNAM.
17. www.ine.gob.mx.
18. www.semarnap.gob.mx.