

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS



TESIS DOCTORAL

**UN MODELO BIDIMENSIONAL PARA LA ELIMINACIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS POR VÍA MARINA: ANÁLISIS Y
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

ISABEL PADILLA LEÓN

Las Palmas de Gran Canaria, 1991

Universidad De Las Palmas De Gran Canaria

Facultad de Ciencias del Mar
Departamento de Matematicas



Isabel Padilla Leon

**Un Modelo Bidimensional para la eliminacion de
residuos solidos por via marina: analisis y formulacion
del problema.**

Tesis Doctoral

Realizada bajo la direccion del Profesor Jose Miguel Pacheco Castelao

Las Palmas de Gran Canaria
MCMXCI

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

LAS PALMAS DE G. CANARIA

N.º Documento 342.742

N.º Copia 342.764

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
DEPARTAMENTO DE MATEMATICAS

*UN MODELO BIDIMENSIONAL PARA LA ELIMINACION
DE RESIDUOS SOLIDOS POR VIA MARINA: ANALISIS
Y FORMULACION DEL PROBLEMA.*

Memoria presentada por la Licenciada en Ciencias del Mar Dña. M^a Isabel Padilla León, para optar al grado de Doctor, dirigida por el Dr. D. Jose M. Pacheco Castelao.

Las Palmas de Gran Canaria

1.991

D. JOSE MIGUEL PACHECO CASTELAO, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Matemáticas de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,

CERTIFICA:

Que la presente memoria ha sido elaborada por la Licenciada en Ciencias del Mar D^a ISABEL PADILLA LEON bajo mi dirección, y constituye su trabajo para optar al Título de Doctor en Ciencias del Mar.

Las Palmas de Gran Canaria, 10 de Enero de 1991.



A mis padres.

A mi hermana.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a todas las personas que directa o indirectamente han participado en la realización de este trabajo.

A mi director J.M. Pacheco por su confianza.

A Isabel por su estímulo.

A César, Angelo, Vicente y Amparo por su apoyo.

A Angeles y Fara por su interés.

A Ali, Lucy y Pily por su empuje.

A Rafael Montenegro por su ayuda en los cálculos.

A Joaquín Hernández Brito por su ayuda en el contraste de resultados.

A Angelo por su ayuda en la corrección del texto.

A los Servicios de Documentación del Museo Canario y de "La Provincia", en especial al redactor Michel J. Millares, por las facilidades para la consulta de hemeroteca.

A la Universidad de Las Palmas de G.C. y al Departamento de Matemáticas por esta oportunidad.

A todos mis compañeros de la Primera Promoción de Ciencias del Mar, especialmente a aquellos que no han tenido esta oportunidad.

INDICE

	<i>Pág.</i>
I. INTRODUCCION Y OBJETIVOS	6
II. IMPACTO DE ASUNTOS AMBIENTALES EN LA OPINION PUBLICA UN ESTUDIO HEMEROGRAFICO	12
II.1. Generalidades	13
II.2. Diagnóstico de situaciones ambientales	14
II.3. Estudio de las respuestas sociales	20
III. EL PROBLEMA DE LA ELIMINACION DE RESIDUOS	50
III.1. Introducción: El problema en Gran Canaria.	51
III.2. Modelos para la gestión ambiental.	63
III.2.1. Consideraciones generales acerca de su construcción y aplicación	63
III.2.2. Algunos ejemplos acerca de modelos que se han utilizado en estudios de calidad de un medio.	69
IV. FORMULACION DE UN MODELO BIDIMENSIONAL.	88
IV.1. Bases metodológicas del modelo.	89
IV.2. Planteamiento del modelo.	91
IV.2.1. Formulación clásica	91
IV.2.2. Una nueva visión del problema	94
IV.3. Cuestiones complementarias al modelo.	105
V. EXPERIMENTOS NUMERICOS	110
V.1. Resultados de los experimentos	111
V.2. Sobre los métodos numéricos.	117
V.3. Representaciones gráficas.	123
VI. CONCLUSIONES.	135
VII. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA	143

I.
INTRODUCCION Y OBJETIVOS.

Escribe A.J. Lotka, uno de los fundadores de la Biología Matemática, en el prefacio de su famoso texto (Lotka, 1926): "The preface is that part of a book which is written last, placed first, and read least". La cita, aunque pierde gran cantidad de su fuerza al traducirla, indica las dificultades del científico para hacerse comprender por la sociedad. En este trabajo pretendemos que, aún siendo ciertas las dos primeras afirmaciones, no se cumpla la tercera.

Una introducción debe despertar el interés por el trabajo que encabeza y servir como guía en la comprensión del mismo. Por ello, en lo que sigue se describirá el origen y desarrollo de esta memoria, poniendo de relieve aquellos aspectos que realmente son claves para su entendimiento.

El campo de estudio de las Ciencias del Mar es enormemente amplio y contiene como parte sustancial la consideración de las interacciones mar-tierra-atmósfera-actividad humana. En esta zona fronteriza entre la Oceanografía, la Ecología, la Economía, la Sociología, etc. los problemas no pueden reducirse a ejercicios de estilo que se resuelven de modo independiente: Es necesaria una visión global en la que se plantee la oportunidad o no de tratar el problema, la selección de las técnicas de ataque al mismo y las conexiones que plantea el problema entre las diversas ciencias que participan en su estudio. Para esta memoria se ha considerado la cuestión de la eliminación de residuos por vía marina, un problema que aparece como básico en la clasificación de Kechum, citada en el excelente libro de Carter (Carter, 1988) de usos de la franja litoral.

Dado que el estudio se realiza en las Islas Canarias, concretamente en Gran Canaria, un primer paso consiste en un análisis de la sensibilidad de la opinión pública hacia cues-

tiones relacionadas con el medio ambiente, en especial porque extensiones de tierra tan pequeñas como nuestras islas pueden considerarse como zonas litorales en su integridad. Por ello y por ser el litoral una zona de conexión de distintas ciencias, la Sociología, considerada en este caso como medida estadística de la opinión pública, ocupa un lugar importante, pudiendo reafirmar (o no) la oportunidad de cualquier trabajo de investigación. Como indicador se utilizó la prensa diaria de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria, en un seguimiento de ocho años. Los resultados son alentadores, pues indican una sensibilización de la sociedad canaria hacia los problemas ambientales.

Posteriormente se estudió en detalle el proceso de eliminación de contaminantes, encontrándose que un punto de interés radica en el "tiempo de residencia" de las sustancias depositadas en zonas marítimas próximas al litoral. Este asunto ha sido tratado escasamente en la literatura oceanográfica, aunque es un tema clásico en la teoría de los procesos estocásticos. Este trabajo pretende ser, por tanto, el eslabón que comunique un problema oceanográfico de vital importancia, como es la eliminación de residuos al mar, con una técnica novedosa, aunque cada vez más extendida, en cuestiones relacionadas con la gestión medioambiental. Los resultados encontrados en este trabajo son del orden de los hallados experimentalmente.

Para el caso unidimensional el problema equivale al tiempo de caída a través de la columna de agua, y ha sido objeto de otros trabajos de este Departamento (Fernández, 1988; Pacheco y Fernández, 1988).

Como consecuencia de los puntos anteriores, se planteó finalmente el problema desde el punto de vista de analizar una

contaminación fundamentalmente estética en zonas marinas próximas al litoral habitado. Naturalmente siempre se ha tenido *in mente* el área correspondiente al NE de Gran Canaria. Así las cosas, la formulación adecuada resulta ser "*Calcular el tiempo de residencia, en superficie, de partículas causantes de contaminación estética*". Notamos que estas partículas, por otra parte, pueden tener actividad química o biológica, dando origen a sustancias nuevas o a modificaciones de la calidad biogeoquímica de las aguas costeras. En la Facultad de Ciencias del Mar se han realizado trabajos en la línea de la complejación y especiación química, que han resultado de interés, sin embargo en esta memoria se ha buscado una formulación simple, macroscópica, que permita obtener una estimación del tiempo de permanencia de partículas contaminantes en la zona de estudio, en la idea de que esa estimación pueda usarse como parámetro indicador para el diseño de los procesos de vertido en la gestión ambiental.

El problema se atacó elaborando un modelo sencillo que, basado en la consideración de un proceso estocástico, conduce a una ecuación de Fokker-Planck en la cual los coeficientes son datos observables: El campo de velocidades y el coeficiente de difusión turbulenta. A partir de esta ecuación se obtiene una ecuación elíptica que, acompañada de las condiciones de contorno adecuadas, constituye la expresión del modelo.

La cuestión final fue la resolución numérica del modelo para varias situaciones con datos similares a los reales. Se seleccionaron valores para el coeficiente de difusión turbulenta y ciertas formas especiales para el campo de velocidades y se resolvió la ecuación por medio de un método de elementos finitos adaptativo desarrollado en el Departamento de Matemáticas de la ULPGC (Montenegro, 1988). Los resultados obtenidos son

del orden de los observados por investigadores experimentados, con lo cual concluye este trabajo dejando abiertas las puertas para posteriores desarrollos. En el cuerpo del texto se encontrarán las críticas, aproximaciones y propuestas que se desprenden de los estudios llevados a cabo para su confección. A continuación se exponen de forma concisa los objetivos que se plantearon inicialmente para la confección de esta memoria.

Como nota final, señalar que dentro de cada capítulo las figuras y tablas van numeradas correlativamente, mientras que la numeración de las fórmulas se refiere sólo al apartado en que aparecen. Las citas bibliográficas se señalan con nombre del autor o autores y el año de publicación.

En cuanto a los objetivos planteados en la elaboración de este trabajo podemos destacar los siguientes:

- a) Análisis de sensibilidad de la opinión pública ante cuestiones que tengan relación con el medio ambiente, con el fin de estudiar el interés del trabajo desde un punto de vista social.
- b) Revisión de métodos de modelización dentro del problema general de la contaminación.
- c) Formulación de un modelo para estimar el tiempo de residencia de residuos vertidos al mar en una zona limitada.
- d) Experimentos numéricos con el modelo y obtención de resultados a partir de él.

II.
IMPACTO DE ASUNTOS AMBIENTALES EN LA
OPINION PUBLICA: UN ESTUDIO HEMEROGRAFICO.

II.1. Generalidades.

Todo lo relacionado con la gestión del medio ambiente tiene una importante trascendencia social. Son temas que interesan y preocupan a la opinión pública en general, y a la canaria en particular. Esta afirmación la podemos hacer en base a una primera parte del trabajo, que vamos a exponer en este capítulo, basada en la toma de datos de hemeroteca. Hemos organizado así un archivo con distintos temas relacionados con cuestiones medioambientales de diversos tipos.

Hemos enfocado estas cuestiones, por supuesto, en torno al mar, pero sin perder nunca de vista que una gestión del medio ambiente únicamente puede ser eficaz si se realiza de una manera integral, o al menos buscando una visión lo más global posible.

El papel del mar en el desarrollo de cualquier sociedad isleña tiene una trascendencia vital. Por otra parte, el mar se puede considerar una prolongación de la vida que se desarrolla en tierra. Por tanto, una buena gestión de recursos en ésta repercutirá en un desarrollo óptimo de aquél. Por ello es siempre importante tener una visión de los factores que relacionan ambos subsistemas del sistema natural.

Por todo ello está casi de más decir que siempre que se tenga que tomar alguna decisión en torno al litoral se deben de considerar todos los factores que se vean directa o indirectamente implicados. Hay que tener en cuenta que la ordenación y gestión de los espacios litorales es bastante conflictiva. Este

tipo de actuaciones provoca choques de intereses debido a la dificultad de las planificaciones y a las filosofías empleadas para fundamentar los planes.

11.2. Diagnóstico de situaciones ambientales.

Antes de embarcarse en el diseño de nuevas actuaciones en un espacio litoral hay que disponer de un diagnóstico de la situación. Sin él no es posible llevar a cabo los estudios posteriores del impacto sobre el medio, que pueda ser achacado a esas actuaciones. Se debe, por tanto, realizar una descripción lo suficientemente exhaustiva, que sea informativa, esclarecedora y, al mismo tiempo, científica (Costa Morata, 1981). Podemos, para ello, estudiar tres factores:

I.- TIPO DE IMPLANTACION,

que puede dar lugar a conflictividad, como:

- Puertos deportivos;
- Obras de infraestructura (puertos, carreteras litorales, vertidos "no contaminantes", etc...).
- Industrias.

La instalación de cualquier tipo de industria suele dar lugar a intensas discusiones, sobre todo entre los habitantes de la zona donde se quieran instalar y las administraciones. Esto es debido fundamentalmente a los residuos que se producen y a su gestión, aunque esta visión del problema ha venido a sustituir bastante tarde a la más utilitaria y materialista basada en la mera aritmética de los puestos de trabajo.

- Parques marítimos;
- Equipamiento turístico.

Ejemplos que ilustren este primer punto a estudiar a la hora de hacer cualquier tipo de actuación en el litoral los encontramos en el archivo de temas medioambientales que, como decíamos al principio, hemos organizado como primera aproximación de este trabajo y para justificar el interés y oportunidad en la elección del tema.

En esta investigación en la prensa local hemos hallado, como muestra de la conflictividad a la que puede dar lugar la gestión de espacios litorales, los siguientes ejemplos: Con fecha 24.VIII.88 aparece en el periódico La Provincia (Pág. 11) el artículo titulado, *"La apertura de una carretera provoca la destrucción de la flora y la fauna marina"*; el 10.I.89 aparece en La Provincia (Pág. 9), *"El Ayuntamiento de San Bartolomé abre una carretera en un Parque Natural"*.

Otro conflicto de este tipo se produjo en las Dunas de Corralejo: Se empezó a construir una carretera; y además se pretende urbanizar, lo cual ha dado lugar a un conflicto de intereses, en este caso entre administraciones. El MOPU lo prohibió en cumplimiento de la Ley de Costas vigente, mientras que el alcalde de La Oliva decidió continuar las obras. Hay que tener en cuenta que las Dunas de Corralejo fueron declaradas Parque Natural en 1982 (el 15.X.82).

En relación a esto el 29.III.84 aparece en La Provincia el artículo *"El Gobierno Autónomo no comprende que siga trabajándose en las Dunas de Corralejo"*; el 22.VIII.89 aparece en Diario de Las Palmas, *"González Arroyo se come las Dunas de Corralejo"*; el 15.III.90 aparece en Canarias7, *"Costas precinta las obras en las Dunas de Corralejo"*; 18.V.90 en La Provincia, *"José Fernández delimitó el Parque Natural de Las Dunas"*; 18.V.

90 en Canarias⁷, *"Oposición a los deslindes de Costas en Corralejo"*.

Otro problema que ha suscitado mucha polémica en la isla de Gran Canaria ha sido lo que se ha dado en llamar vertidos "no contaminantes". Un ejemplo de ello ha sido la intención de hacer un paseo marítimo que una Taurito con Mogán, mediante terreno ganado al mar con este tipo de vertidos. Encontramos las siguientes referencias sobre esto: 27.XI.87 en Diario de Las Palmas, *"Las obras entre las playas de Taurito y Mogán son ilegales"*; 14.XII.87 en Diario de Las Palmas, *"Denuncian atentados en el litoral de Mogán"*; 2.XII.87 en Diario de Las Palmas, *"Estalla el escándalo por el destrozo del litoral"*; 4.VIII.88 en La Provincia, *"Gobierno y Cabildo creen que los vertidos de Taurito son una grave infracción"* (Portada), *"El Ayuntamiento permitía hasta ayer los vertidos en Taurito"* (Pág. 6); 14.XI.88 en Canarias⁷, *"Vertidos ilegales tupen el Barranco de Taurito"* (Una vez suspendido oficialmente el vertido de residuos "no contaminantes" en el litoral de Mogán, los residuos se han empezado a acumular en el barranco, en suelo calificado como rústico, sepultando comunidades de tabaibas, cardones, etc., siendo otra consecuencia de una desacertada gestión); 25.VI.89 en La Provincia, *"Costas se autorresponsabiliza de los vertidos de Taurito a Mogán y se compromete a retirarlos"*.

En cuanto a las industrias, como ya dijimos, suelen provocar mucha polémica y, aunque el Archipiélago Canario no es una zona eminentemente industrial sí hay industrias de alguna envergadura. Por ejemplo, la planta potabilizadora de Las Palmas ha provocado la protesta de los vecinos de la zona

ya que genera una cantidad de humos que les resulta muy molesta. Hay que tener en cuenta que la potabilizadora ha crecido mucho en los últimos años, debido a la escasez de agua de la isla, y la zona de Jinámar también ha crecido como zona residencial.

El proyecto de instalar una central eléctrica en el sureste de Gran Canaria, concretamente en la zona de Juan Grande, dentro del término municipal de San Bartolomé de Tirajana, ha provocado mucha polémica, sobre todo por el tipo de combustible a utilizar. La empresa UNELCO se mostraba favorable a utilizar carbón, a lo cual se negaron tanto los vecinos como diversos grupos ecologistas, así como el Ayuntamiento de Santa Lucía (vecino del de San Bartolomé) y la propia oposición del Ayuntamiento de San Bartolomé. Recientemente el Parlamento de Canarias ha decidido que la central funcione con fuel, aunque va a tener una instalación complementaria que le permita utilizar otros tipos de combustible en caso de necesidad. Sobre este tema encontramos las siguientes referencias: 18.V.90 en La Provincia, "*300 escolares se manifiestan en contra de la central de carbón de Juan Grande*"; 7.VI.90 en La Provincia, "*Acentejo Sureño denuncia que la central térmica no cumple el PECAN*"; 22.VIII.90 en La Provincia, "*Alta tensión*".

II.- CARACTERÍSTICAS generales y comunes de dichas implantaciones, tales como

- Ecológicas (valor botánico, zoológico, geológico, etc...);
- Geomorfológicas, dada la alteración que pueden provocar, a veces de forma definitiva, algunas de dichas implantaciones sobre la dinámica marina, las estructuras geológicas y sobre la configuración y equilibrio físico del litoral. Los puertos

deportivos, por ejemplo, provocan muchas veces variaciones sobre la dinámica de la zona donde se construyen.

- Paisajísticas;
- Urbanísticas;
- Jurídico-administrativas;
- Socioeconómicas;
- Políticas;
- Psicológicas.

III.- ANALISIS DE RESPUESTAS, tanto administrativas como sociales.

El análisis de las respuestas de tipo social ante cuestiones que tengan relación con el medioambiente lo hemos hecho a partir del fichero elaborado con material de hemeroteca de los últimos ocho años. Dicho fichero ha quedado dividido en los siguientes epígrafes:

- 1.- VERTIDOS, tanto fecales como de hidrocarburos, radiactivos, etc...
- 2.- GESTION DEL LITORAL. Aquí consideramos todo lo relacionado con la intervención urbanística en el litoral.
- 3.- DEPURADORAS. Este tema está íntimamente relacionado tanto con el de vertidos como con el de gestión del litoral, ya que cualquier aumento de la población da lugar a un incremento del volumen de agua residual a eliminar y esto siempre tiene consecuencias sobre las zonas litorales. Como ya dijimos, el desarrollo de las zonas litorales se puede considerar una extensión de la vida que se realice en la tie-

rra.

Los aumentos de población son, por otra parte, un hecho frecuente en las zonas turísticas, donde la población aumenta de forma notable en épocas de temporada alta. Esto suele ir acompañado de problemas de infraestructura, que en el caso que nos ocupa se pueden concretar en la eliminación de agua residual. Además, casi siempre se toma una alternativa rápida, cómoda y barata (por supuesto a corto plazo), como es el vertido al mar del agua residual, normalmente sin tratamiento ni estudio previo.

- 4.- RESIDUOS SOLIDOS. Ocurre lo mismo que con las depuradoras. Una gestión integral de las basuras es fundamental en el desarrollo de una ciudad y, sobre todo, en un espacio tan limitado como el de una isla.
- 5.- AGUA. Aquí hemos considerado todo lo relacionado con las potabilizadoras, así como protestas ciudadanas, soluciones alternativas, etc..., que se plantearon en los momentos más críticos de la escasez de agua. Hay que tener en cuenta la trascendencia de este tema en el desarrollo de cualquier ciudad, y en el caso concreto de la provincia de Las Palmas donde la economía se fundamenta en el turismo y en la agricultura, el tema se convierte en vital.
- 6.- ECOLOGIA. En este tema se consideran asuntos tales como la extracción de áridos, que tiene una relación directa con el desarrollo del turismo, concretamente con el sector de la construcción; parques naturales; consecuencias de la mala gestión (por ej. que aparezcan peces muertos sin razón aparente), además de temas "científicos" (o científico-divul-

gativos) que sean abordados en este tipo de prensa.

7.- PLAYAS. Aquí se ha considerado todo lo relacionado con las playas y que no está dentro de los temas anteriores, como su limpieza, utilización, conservación, etc...

8.- OTROS. Aquí se ha considerado todo lo relativo a decisiones políticas, grupos ecologistas, leyes relacionadas con la naturaleza y cualquier otro tipo de noticias que no se ajuste a ninguno de los temas anteriores.

11.3. Estudio de las respuestas sociales.

En algunos de los apartados señalados en II.2, como en el de vertidos, la evolución de la cantidad de información respecto al tiempo es casi cíclica cada año, con un máximo en verano, que suele ser el mayor de todos (aunque no siempre lo es); otro en Marzo-Abril (aproximadamente en Semana Santa), que es el más variable, unas veces aparece, otras no, unas es grande, otras pequeño, unas aparece más cerca del verano y otras más lejos, etc... La información del verano y la Semana Santa se basa fundamentalmente en vertidos fecales, sobre todo relacionados con las playas, ya que en estas fechas es cuando su utilización por parte de la población es máxima. Además, en verano la información relacionada con cualquier tipo de vertidos, incluso radiactivos, aumenta mucho, y el hecho de que en meses anteriores se haya denunciado la presencia de vertidos radiactivos, mareas negras, etc..., también se refleja en la información de la época estival. Las gráficas con la evolución temporal de los vertidos se muestran en las páginas siguientes.

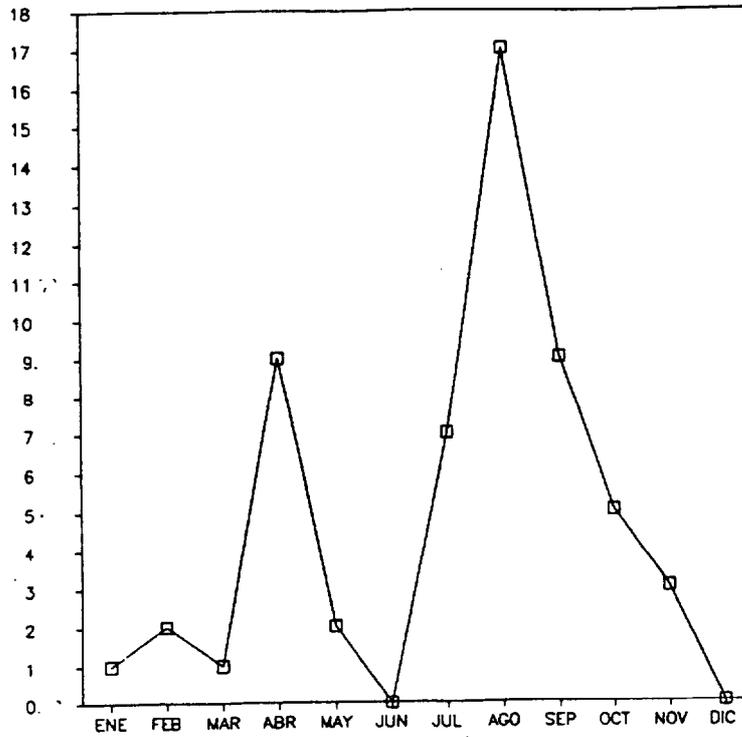


Fig. 1. - Evolución del tema de vertidos durante 1982. Podemos observar la situación típica, con un pico próximo a la Semana Santa y otro en verano.

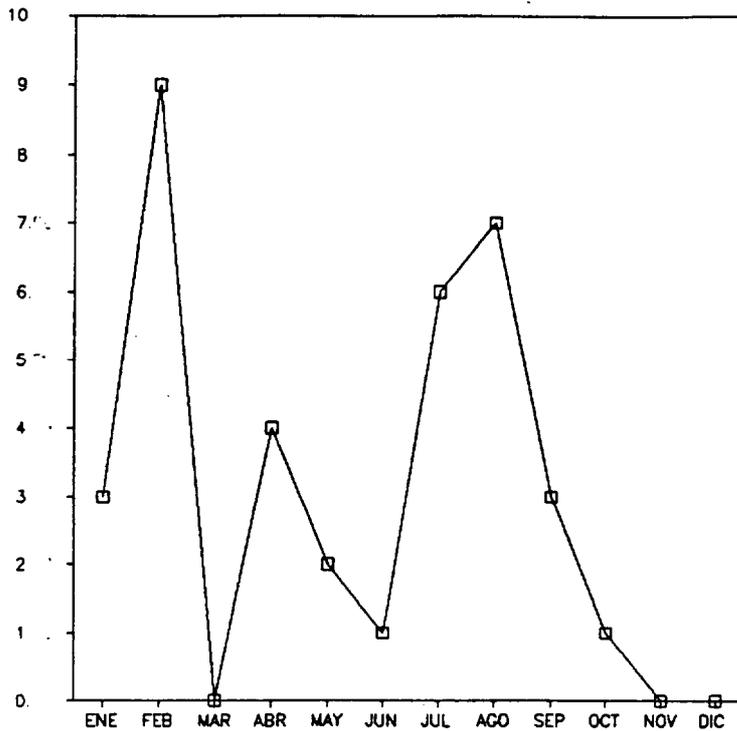


Fig. 2. - Vertidos en 1983. Además de los picos típicos, aparece uno en Febrero como consecuencia de la denuncia de vertidos radiactivos en la fosa atlántica.

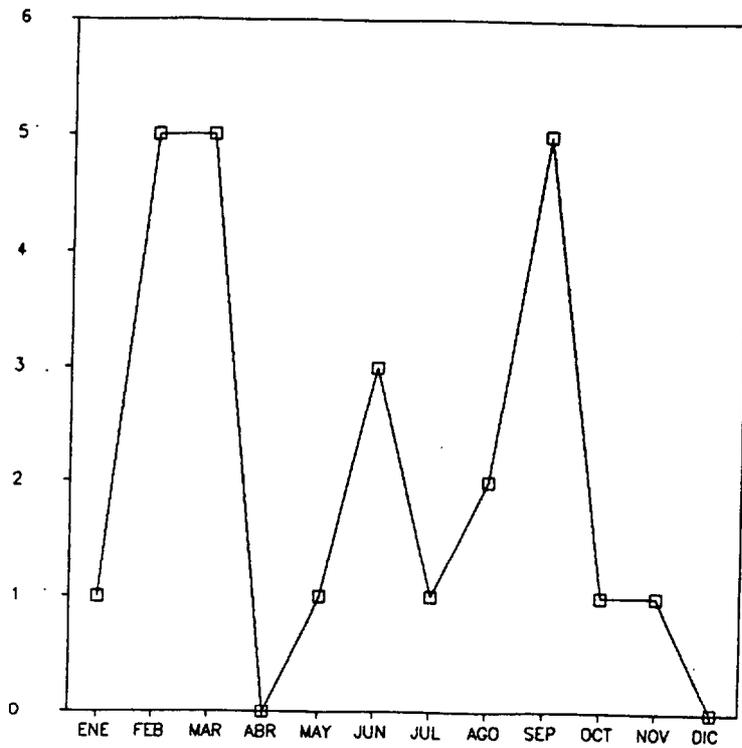


Fig. 3. - Vertidos durante 1984.

Observamos el pico de verano, aunque no el de Semana Santa. También hay uno en Febrero-Marzo, consecuencia de la denuncia de vertidos radiactivos del año anterior.

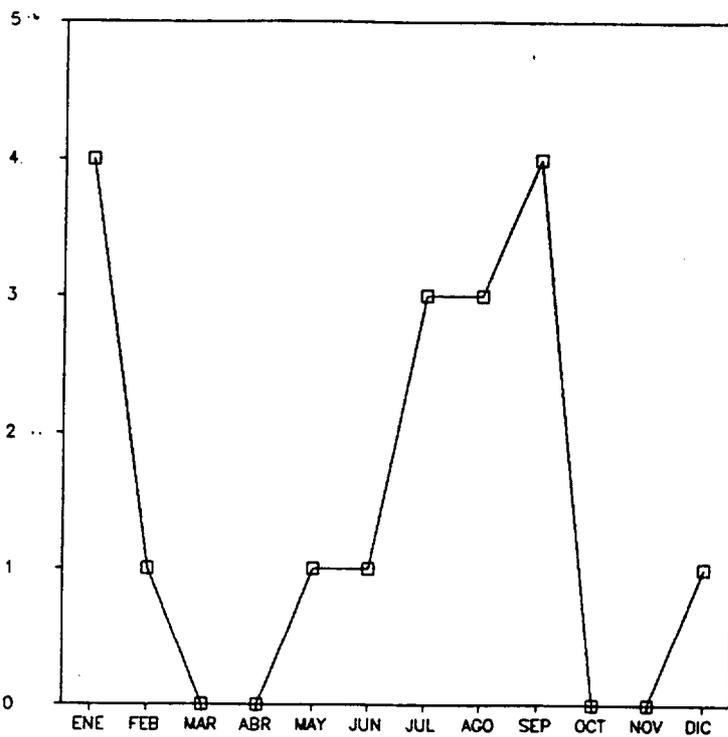


Fig. 4. - Vertidos en 1985.

Este año se observa que hay poca información aunque sigue destacando el pico de verano.

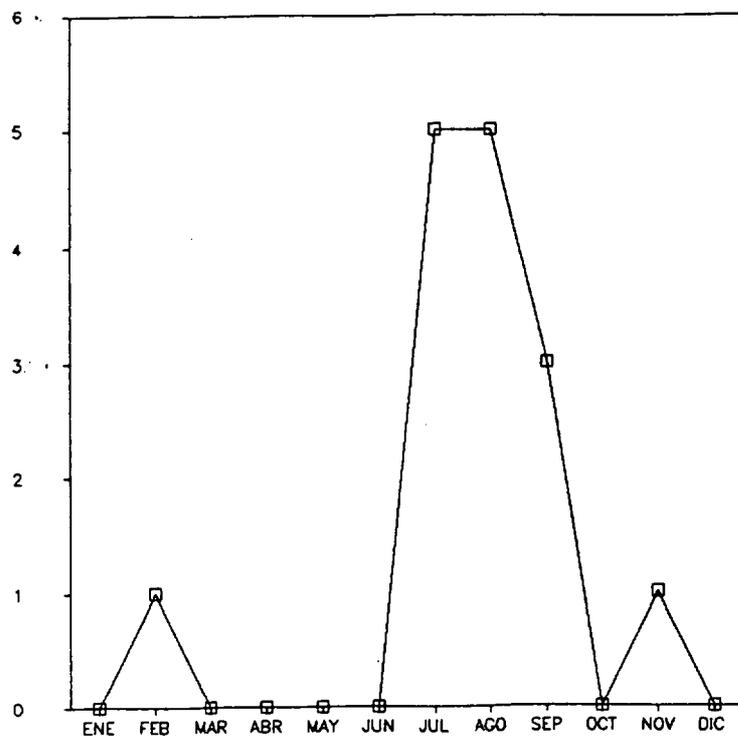


Fig. 5. - Vertidos en 1986.
Destaca, como siempre, el pico de verano.

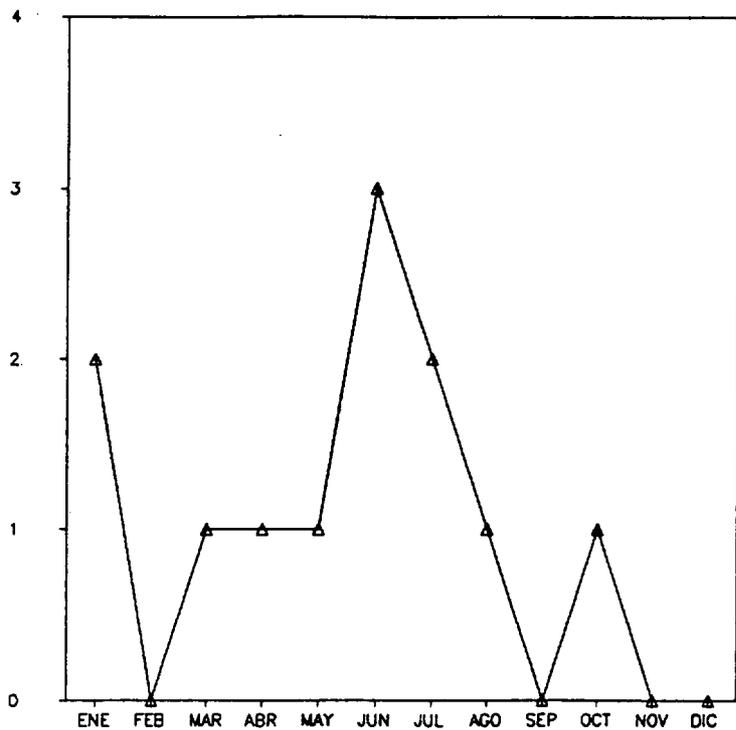


Fig. 6. - Vertidos en 1987.
Este año aparece poca información, aunque sigue destacando el pico de verano.

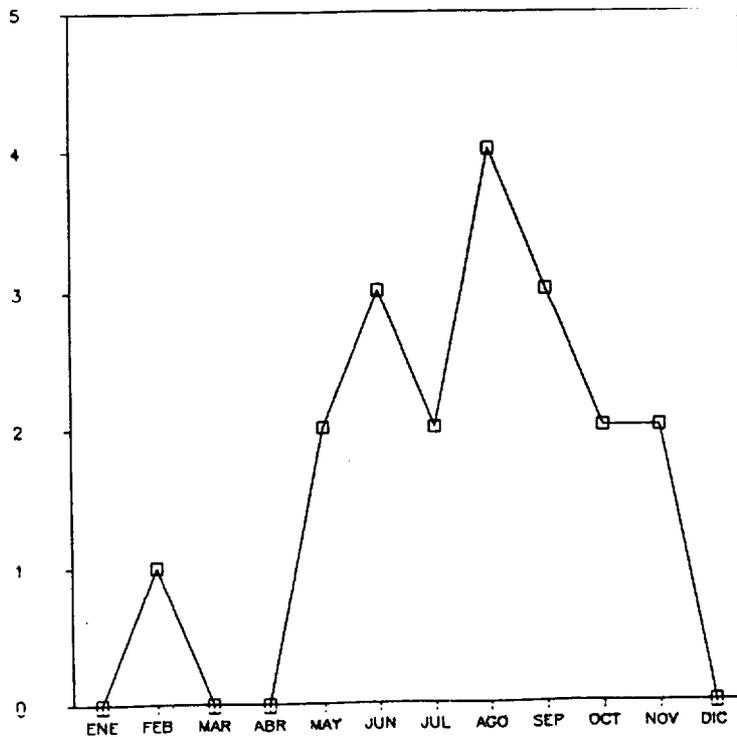


Fig. 7. - Vertidos en 1988.

Se sigue repitiendo la situación de años anteriores.

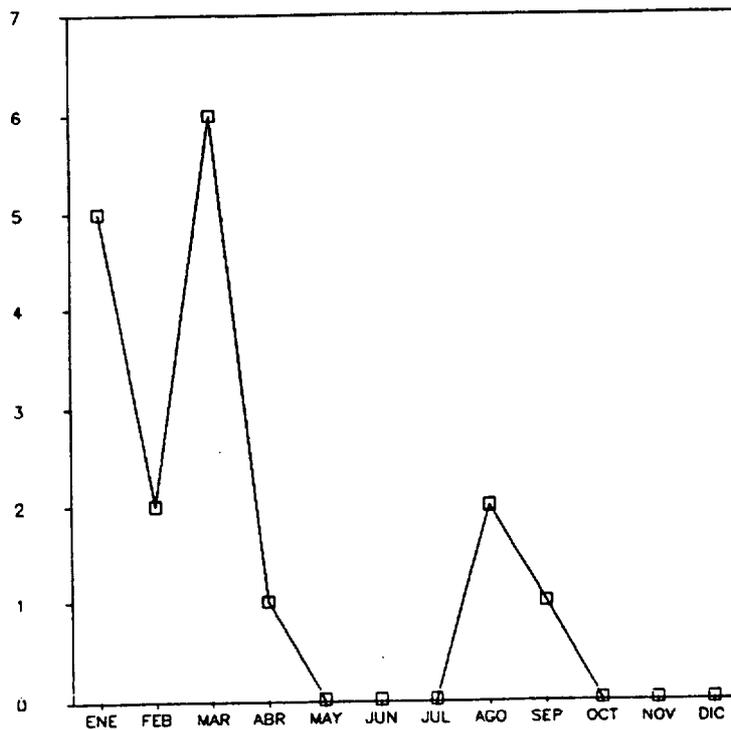


Fig. 8. - Vertidos en 1989.

Aunque se sigue observando el pico de verano, no es el mayor. Esto se debe a que la crisis turística hace que aumenten las denuncias de vertidos, en épocas donde la afluencia de turistas ha sido siempre alta.

Es significativo que parte de la información se repita periódicamente, aunque no siempre en ciclos anuales, sino que algunas veces se olvida un tema y al cabo de un cierto tiempo vuelve a aparecer. Esto ocurre por ej. con los desagües que van a parar a Las Canteras, la falta de atención de Las Alcaravaneras, los vertidos en la Avenida Marítima o la lista de playas "contaminadas", donde cada verano se prohíbe el baño y que, a pesar de ser siempre las mismas y de tener el problema perfectamente localizado, no encuentran solución.

A continuación damos una lista de referencias que muestran esta repetición cíclica de la información. Comenzamos con una serie referida a vertidos de aguas residuales en el entorno ciudadano.

3.VIII.82. La Provincia. "*Aguas fecales en Las Canteras*".

Sanidad denuncia la presencia de un vertido incontrolado a la altura de Bernardo de la Torre y Sargento Llagas. Se han venido tomando cinco muestras con resultado satisfactorio, aunque se recomienda la instalación de una depuradora para evitar los vertidos al mar.

18.VIII.82. La Provincia. "*La Playa Chica y la Cicer están contaminadas*".

Según la Consejería de Sanidad. No se recomienda el baño en estos dos puntos de Las Canteras.

11.IX.82. La Provincia. "*La tubería de Las Canteras*".

15.X.82. La Provincia. "*Se abre una gran zanja en la Avenida de Las Canteras*".

Frente al "Pinito del Oro". Se sospecha que pueda servir para el vertido de aguas sucias.

- 20.X.82. La Provincia. *"Playicidio municipal en Las Canteras"*.
- 26.X.82. La Provincia. *"Nuevos desagües en Las Canteras"*.
- 27.X.82. La Provincia. *"El alcalde paraliza las obras de vertido de aguas sucias en la playa de Las Canteras"*.
- 21.VIII.83. La Provincia. *"Las Canteras: Un abandono intolerable"*.
- 6.VI.88. Diario de Las Palmas (Portada). *"Un río de aguas residuales inunda Las Canteras"*.
- 6.VI.88. Diario de Las Palmas (Pág. 6). *"Casi un millón de metros cúbicos de aguas residuales contaminan la bahía de Las Canteras"*.
- 16.VII.88. Canarias7. *"Hoy se limpia el fondo de Las Canteras"*.
- 3.III.89. La Provincia. *"Prohibido bañarse en una parte de Las Canteras"*.
- En la zona comprendida entre Peña la Vieja y la Cicer. Es debido a la rotura de la estación de bombeo de aguas residuales de la Cicer con motivo de las recientes lluvias.
- 15.III.89. La Provincia. *"La limpieza y el futuro de Las Canteras dependen de la regeneración de la playa"*.
- 14.VIII.89. Canarias7 (Portada). *"Aguas fecales del alcantarillado "bañaron" Las Canteras"*.
- A la altura de Peña la Vieja como consecuencia de un tapón producido en el alcantarillado de la zona.

14.VIII.89. Canarias7 (Pág. 11). *"Las aguas fecales inundaron de nuevo Las Canteras"*.

23.I.90. La Provincia. *"Aguas sucias en la playa"*.

Ningún gobierno municipal ha acometido la renovación de la red de alcantarillado que se encuentra debajo de la Avenida de Las Canteras, causa de la suciedad (manchas) que aparece de vez en cuando en la playa.

23.I.90. Canarias7. *"La concejalía comenzó los arreglos de Las Canteras"*.

7.V.90. Canarias7. *"Ocho meses de obras evitarán los vertidos en Las Canteras"*

18.V.90. Canarias7. *"El saneamiento de Las Canteras costará 750 millones"*.

Tomando como motivo la adecuación de las playas o costas para usos recreativos hallamos la siguiente serie:

19.III.82. La Provincia. *"Prohibición de bañarse en La Garita"*.

8.IV.82. La Provincia. *"Las Alcaravaneras, prohibida; Las Canteras, al completo"*.

La Consejería de Sanidad recomienda que Las Alcaravaneras continúe cerrada al baño mientras los parámetros químicos y biológicos, incrementados en estos días por el tiempo Sur, así lo aconsejen.

- 17.X.82. La Provincia. *"No es aconsejable el baño en la playa de La Garita"*.
- 6.VII.83. La Provincia. *"Otra vez la contaminación playera"*.
Otra vez la costa de Bañaderos es noticia, siempre en verano, debido al vertido de aguas residuales.
- 7.VIII.83. La Provincia. *"La costa de Bañaderos poco recomendable para bañarse"*.
- 16.III.84. La Provincia. *"La playa de Las Alcaravaneras"*.
Cerrada al baño como consecuencia de la contaminación. No sólo debido a los residuos del muelle, sino también al vertido de aguas residuales de la ciudad.
- 29.III.84. La Provincia. *"Playa de Alcaravaneras: Prohibido bañarse"*.
- 17.VIII.86. La Provincia. *"La Garita y Playa del Hombre superan los límites de contaminación admitidos por la OMS"*.
- 20.VIII.86. La Provincia. *"Dos pozos negros infectan la playa de La Garita"*.
- 6.IX.86. La Provincia. *"Aguas negras en La Garita"*.
- 12.X.86. La Provincia. *"Nueve playas contaminadas en Gran Canaria"*.
Alcaravaneras, La Laja, San Cristóbal, Bañaderos, San Andrés, San Felipe, El Hombre, Ojos de Garza y La Garita.

22.X.86. La Provincia. *"Desaparecen presupuestos destinados a solucionar los vertidos fecales en La Garita"*.

14.I.87. La Provincia. *"Se desaconseja el baño en tres playas de la isla"*.

Alcaravaneras, San Cristóbal y La Laja.

22.III.87. La Provincia. *"Desaconsejado el baño en Alcaravaneras y San Cristóbal, en Gran Canaria"*.

13.V.87. La Provincia. *"No se aconseja el baño en tres playas de Las Palmas"*.

Alcaravaneras, San Cristóbal y La Laja (Nótese la coincidencia con la referencia de 14.I.87).

7.VI.87. La Provincia. *"Es peligroso el baño en tres playas del litoral de Gran Canaria"*.

Alcaravaneras, San Cristóbal y La Laja (Se insiste sobre lo mismo).

11.VII.87. La Provincia. *"Sanidad no recomienda el baño en tres playas de G.C."*.

Alcaravaneras, San Cristóbal y La Laja (De nuevo).

2.VII.88. La Provincia. *"Buen estado del nivel bacteriológico de las playas canarias"*.

Aunque se desaconseja el baño en Alcaravaneras, San Cristóbal y La Laja, en G.C. (¡Aún más!).

6.X.88. Canarias⁷. *"La contaminación de La Garita, culpa del Ayuntamiento, según los vecinos"*.

20.V.90. La Provincia. *"La nueva estación de bombeo de La Garita evitará el vertido de aguas residuales en el litoral"*.

De nuevo aparece una nueva serie de informaciones con el control de los vertidos como tema de fondo. En este caso nos vamos a referir al litoral de la ciudad de Las Palmas de G.C.

4.I.83. La Provincia. *"Un litoral infecto. El de Las Palmas"*.

5.VII.84. La Provincia. *"Se controlarán los vertidos que contaminan el litoral de Las Palmas"*.

26.V.85. La Provincia. *"El 85% de las aguas residuales de Las Palmas vierten directamente al mar"*.

11.VIII.89. La Provincia, Canarias7 y Diario de Las Palmas.

"Carta abierta del alcalde".

En un plazo de 18 meses piensa resolver los problemas de vertidos: En los primeros podrá estar terminado el emisario submarino de 2 km. de longitud y 42 m. de profundidad. Dentro de unos 20 meses se podrán depurar todas las aguas de la ciudad, por lo que al fin podrá ser preservado todo su litoral.

8.V.90. La Provincia (Foto del día). *"El mar recoge todo lo que le echan, pero luego pasa factura"*.

Se trata de una foto aérea de una mancha producida por uno de los vertidos de la Avenida Marítima.

En la Gestión del litoral podemos observar que la distribución de la información es bastante más al azar que la relativa a vertidos. A pesar de que se sigue observando un máximo en verano, éste no es el único ni es necesariamente el más evidente, aunque es significativo que se repita todos los años en las mismas fechas. Generalmente la información viene determinada por los acontecimientos que se producen en relación con este tema ya que, si por ejemplo se denuncia la ilegalidad del hotel Dunas la cantidad de información aumenta independientemente de las fechas en que esto ocurra.

Sobre estos temas podemos observar una gran fluctuación, así como una enorme cantidad de información, mucho mayor que en el caso de vertidos.

En las gráficas de las páginas siguientes se recoge la estructura de las informaciones publicadas.

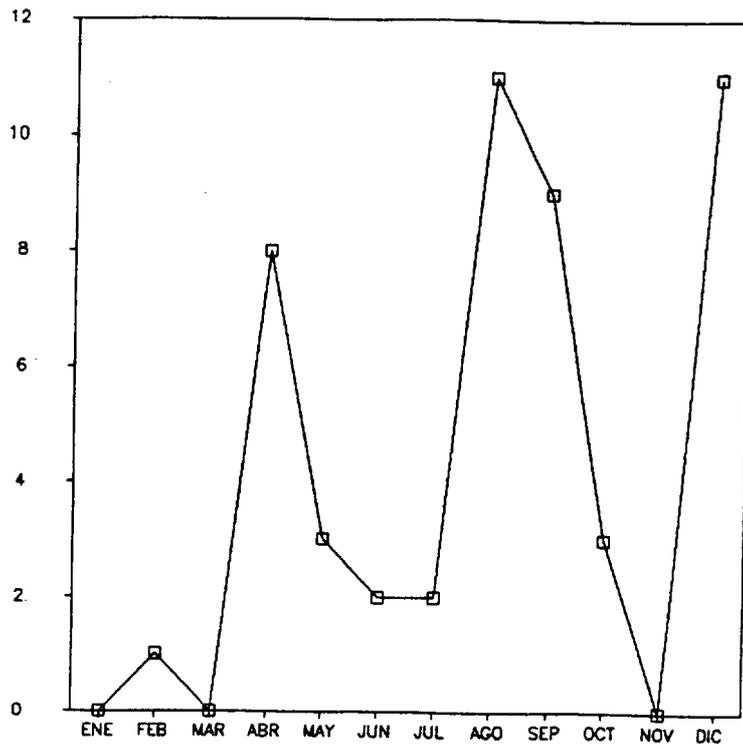


Fig. 9. - Evolución de la información sobre Gestión del litoral en 1989.

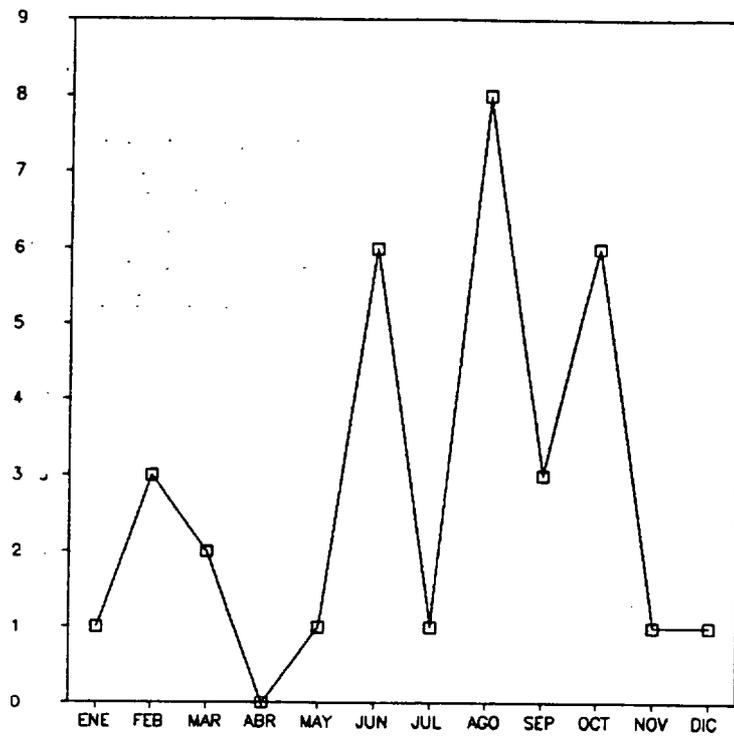


Fig. 10. - Gestión del litoral en 1985.

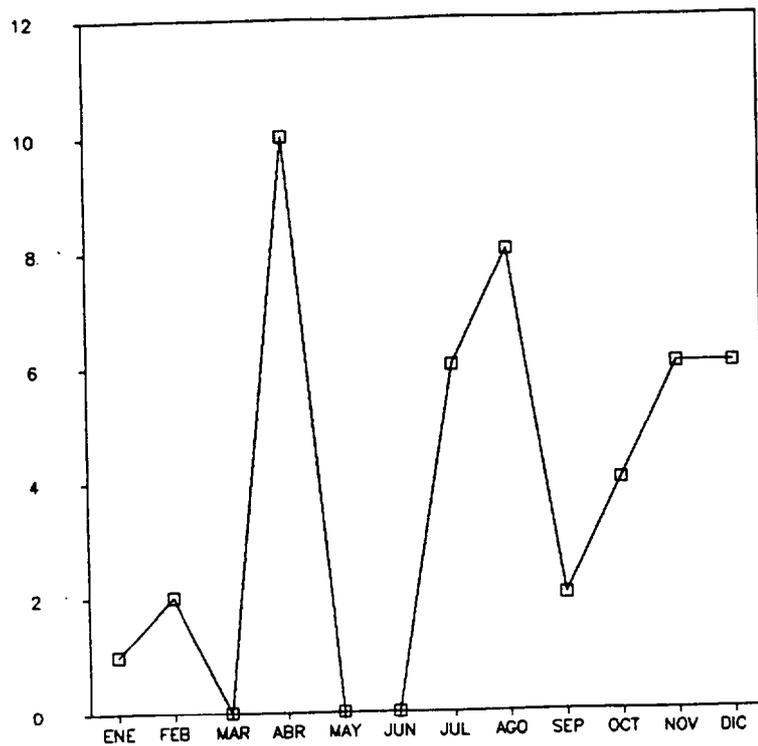


Fig. 11. - Gestión del litoral en 1986.

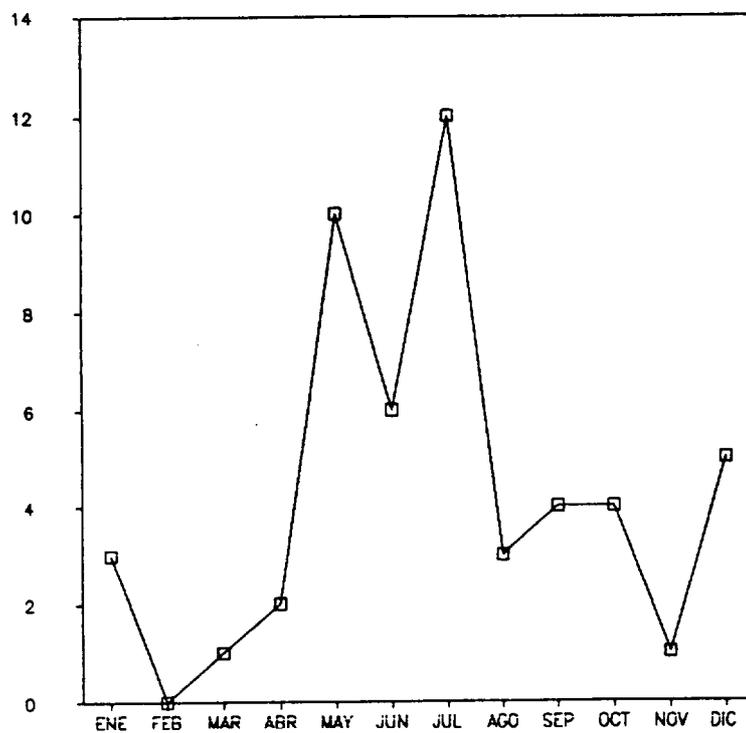


Fig. 12. - Gestión del litoral en 1987.

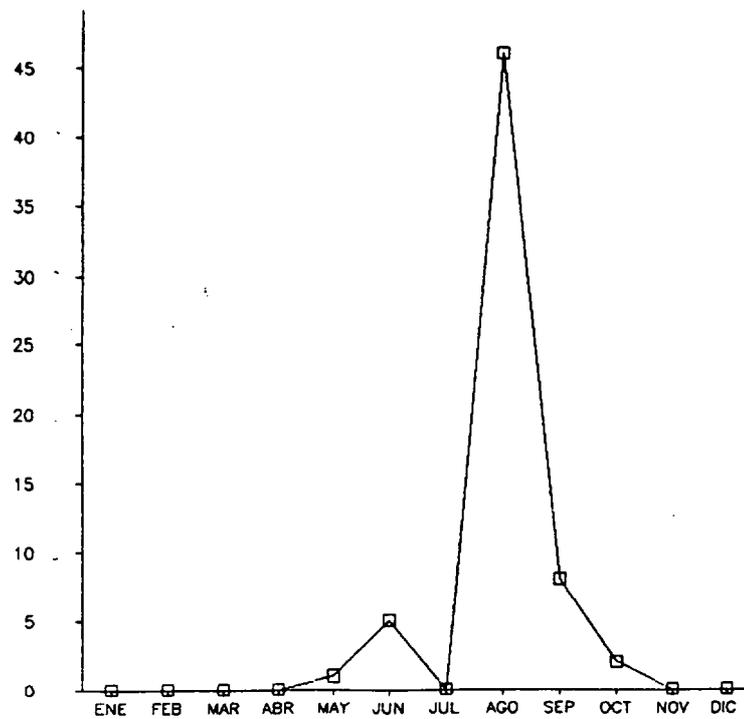


Fig. 13. - Gestión del litoral en 1988.

El pico de Agosto se debe a la corriente social que se desata en Los Pocillos, en contra de su urbanización.

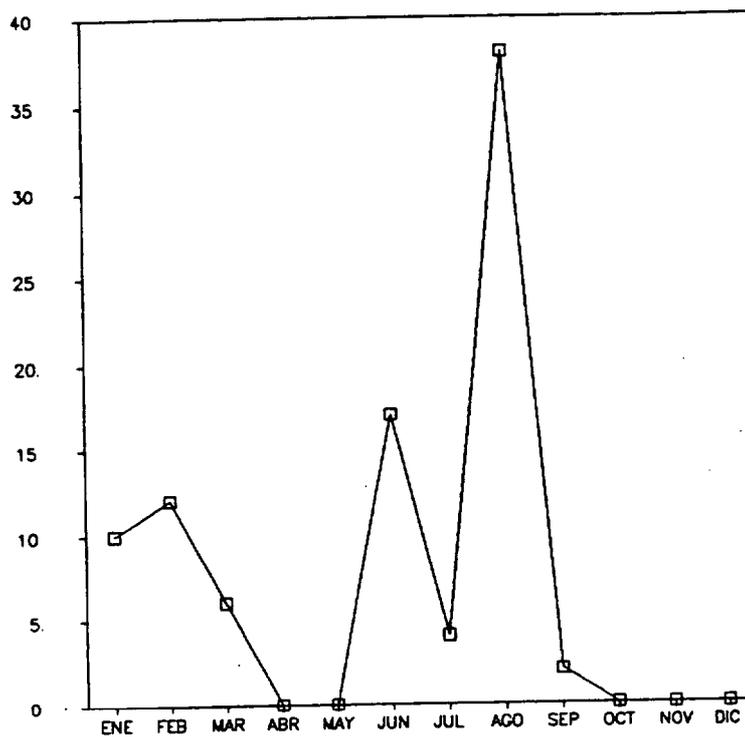


Fig. 14. - Gestión del litoral en 1989.

Los picos de Junio y Agosto se deben a dos hechos puntuales: el derribo del Hotel Dunas y la posible urbanización de Qui-qui.

Las gráficas de los años 1982 y 1984 no se adjuntan en el trabajo por considerarse poco significativas, dada la escasa información encontrada durante estos años referente a la Gestión del litoral.

Hay que tener en cuenta en relación a esto el gran crecimiento del turismo a partir de los años 60, convirtiéndose en el sector económicamente prioritario de las islas, con el consiguiente aumento del sector de la construcción. Como consecuencia de este resurgir económico en las islas se ha producido el deterioro de muchas zonas, así como una gran masificación de las zonas turísticas, lo cual ha traído como consecuencia una disminución en la calidad del turismo.

En consecuencia en la década de los 80, sobre todo en los últimos años, se ha notado una incipiente crisis en el sector lo cual, evidentemente, encuentra su reflejo en la prensa local. De hecho, hemos podido constatar que al pasar los años aumenta la cantidad de información referente a la gestión del litoral, ya que por ejemplo en 1.982 se encontraron sólo dos artículos acerca de este tema, en 1.983 aparecen 50; en 1.985, 26; en el 85, 33; en el 86, 45; en el 87, 51; en el 88, 62; y en el 89, 89. Esto es consecuencia del aumento de la oferta (llegándose a niveles de masificación) y la disminución de la demanda de instalaciones turísticas.

El hecho de que en 1.983 no se cumpla la progresión lineal de que cada año aumenta el número de artículos con respecto al anterior, se debe a una serie de acontecimientos que se produjeron durante este año y que hicieron aumentar la cantidad de información, como son los siguientes: en Abril aparece información sobre el Puerto de Agaete (se quería modificar el

proyecto, protestas de los pescadores de la zona porque pensaban que esto les iba a perjudicar, etc.), así como sobre el Puerto de Mogán. En Septiembre se ordena paralizar las obras del hotel Dunas, lo cual genera también gran cantidad de información, y en Diciembre vuelve a aparecer otra vez información sobre el Puerto de Agaete.

Estos tres puntos coinciden con los máximos de información sobre Gestión del litoral en el año 83.

Algunas veces se encuentran picos mucho mayores de lo habitual, como por ej. en Agosto de 1.988 (46 artículos) o en Agosto de 1.989 (38). Esto es debido a algún hecho puntual. En el primer caso fue un importante movimiento social que se produjo en Lanzarote en contra de las obras que se estaban realizando en Los Pocillos, las cuales como consecuencia de esto fueron paralizadas. Y en el segundo caso fue que se descubrió la venta de terrenos en Güi-Güi y, por tanto, la intención de urbanizar esta zona, una de las pocas que aún se mantiene al margen de la especulación, por estar encuadrada dentro de la zona menos urbanizada (siempre hablando en términos de instalaciones turísticas) de la isla, por lo menos en lo que se refiere a zonas costeras. Esta intención ha generado gran cantidad de protestas por parte de muchos sectores, lo cual ha puesto de manifiesto una incipiente corriente social en contra de seguir urbanizando, y a favor de mantener algunas de las zonas que aún permanecen al margen de la especulación.

Otro hecho que se ha observado es que la información, sobre todo en lo que se refiere a denuncias de infracciones urbanísticas, se mantiene durante un periodo y luego se deja un poco de lado, pero en muchos casos un mismo tema se vuelve a retomar después de transcurrido un periodo, cuando ya parecía olvidado. Esto ocurrió, por ejemplo, cuando se empezaron a

denunciar infracciones en la construcción del hotel Dunas. Primero se ordenó paralizar las obras, luego se olvidó el asunto y al final se retomó, tratando acerca de la decisión de demolerlo y de las compensaciones que iban a obtener los propietarios, así como con la demolición en sí después.

El Agua es trascendental en el desarrollo de cualquier área habitada, pero si además dicha área adolece de escasez de lluvias y de sobreexplotación del acuífero, como en el caso de Gran Canaria, donde además la economía se fundamenta en el turismo y en la agricultura, el problema se convierte en vital. Por todo ello hemos considerado este tema como prioritario dentro de un archivo sobre temas medioambientales.

Podemos observar que la mayor cantidad de información aparece a principios de los 80, sobre todo en el 83, debido a que fueron los años más problemáticos en cuanto a la escasez de agua, llegando incluso a ser agobiante, con fuertes restricciones, muchas protestas de los ciudadanos, etc.

Sin embargo, en años sucesivos el tema se fue apagando. De hecho aparece muy poca información y de forma muy dispersa, a no ser por algún hecho puntual que haga aumentar la cantidad de información, ya que el problema, al aumentar la capacidad y efectividad de la planta potabilizadora, quedó prácticamente solucionado.

Las gráficas sobre este tema se muestran en las páginas siguientes.

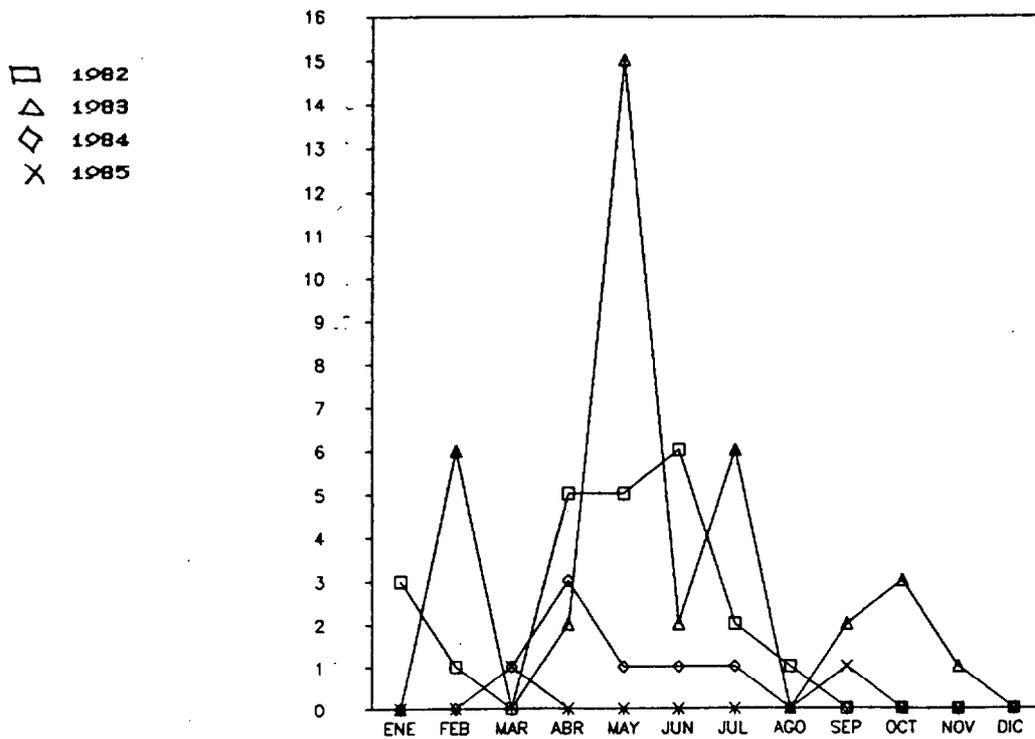


Fig. 15.- Evolución temporal del tema del agua durante el periodo 1982-1985.

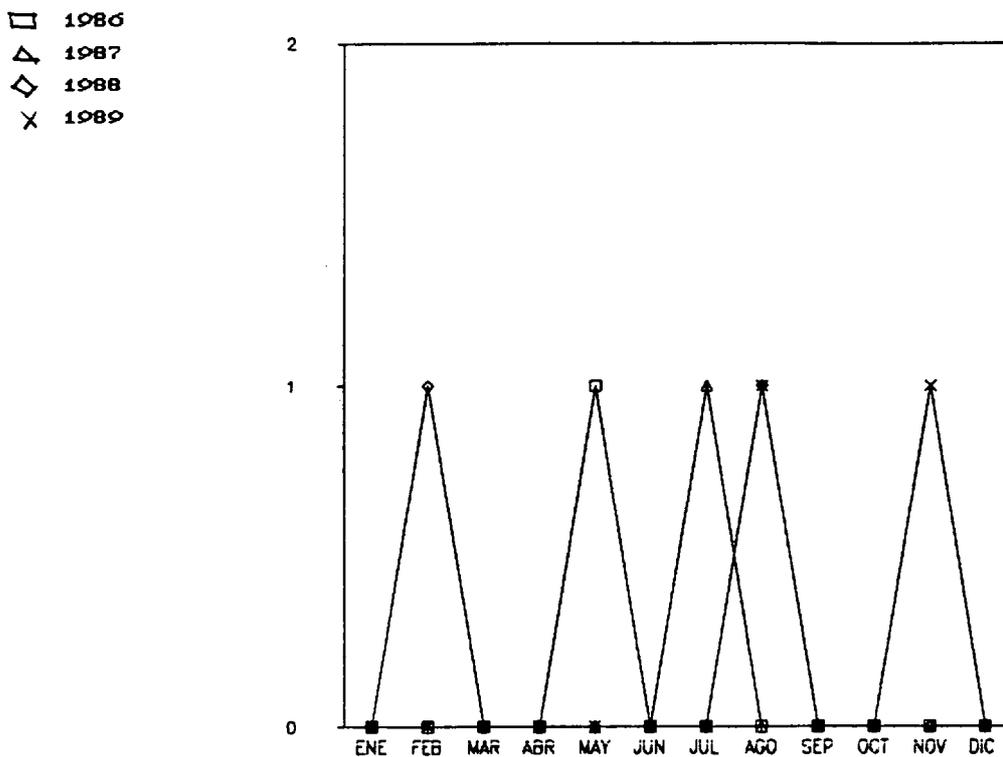


Fig. 16.- Evolución temporal del tema del agua durante el periodo 1986-1989.

Sobre Depuradoras no aparece una gran cantidad de información a pesar de que está, por muchas razones, directamente relacionado con cuestiones medioambientales, sobre todo en lo que se refiere a vertidos.

Una de estas razones es que si no existen depuradoras bien adaptadas a las necesidades de una ciudad (tanto en cuanto a su diseño, como a su capacidad, funcionamiento, gestión, etc...), las aguas residuales de ésta van a parar en última instancia al mar, a veces sin ningún tratamiento, lo cual dificulta en gran medida su degradación por el medio natural, que ve desbordada su capacidad de autodepuración modificándose, por tanto, su normal desarrollo.

Otra de las razones se refiere a la gestión de las depuradoras ya que su mantenimiento resulta bastante caro y, además se precisa un control continuo para que sus parámetros de control se mantengan dentro de los niveles óptimos. Esto supone que cuando una depuradora se estropea, o bien no funciona a un cien por cien de efectividad, el agua residual que no se pueda depurar va a ir también a parar al mar directamente.

Por ejemplo, en Gáldar ha habido protestas por parte de los vecinos debido a problemas de malos olores, así como a impactos estéticos negativos causados por vertidos de aguas residuales, a pesar de que tienen una depuradora desde hace tiempo y, además, proyectan construir otra con mayor capacidad y mejor ubicación. De hecho, con fecha 13.II.90 aparece en el periódico La Provincia el artículo, *"La oposición destaca el apoyo vecinal en la manifestación contra los vertidos residuales"*, en el cual se destaca la crítica por parte de los vecinos del vertido de aguas residuales en diferentes lugares del muni-

pio, afectando a playas y zonas de barranco; el 15.VI.90 aparece en La Provincia, "*La depuradora de Bocabarranco envía aguas negras a varios estanques*". En este artículo los vecinos de Barrial, un barrio de Gáldar, se quejan porque la depuradora envía agua mal depurada a dos estanques, provocando malos olores por los que se consideran gravemente perjudicados. Desde 1973 (según el artículo) llevan sufriendo el mal ambiente por la vieja depuradora. Ya en 1976 protestaron por esta causa, recibiendo la respuesta por parte de Ayuntamiento de solucionar rápidamente el problema. Sin embargo, esto no sólo no se ha cumplido sino que incluso han aceptado últimamente las aguas residuales de algún municipio vecino.

Otro problema relacionado con las depuradoras está en que cuando se encuentran dificultades para comercializar los lodos, éstos también se eliminan por vía marina. Esto ocurre en la depuradora de Barranco Seco, donde los lodos son eliminados a la Avenida Marítima a la altura del Teatro, y por esta causa se puede observar una gran mancha que se hace especialmente notoria y molesta cuando el tiempo está en calma. También hay un vertido de lodos procedentes de depuradora en la playa de Hoya del Pozo (Telde).

Estos lodos procedentes de depuradoras pueden ser incluso más perjudiciales para el medio marino que la eliminación directa del agua residual sin depurar, por tratarse de toda la materia en suspensión que se ha desechado y que se encuentra, por tanto, muy concentrada.

Aunque, en general, no aparece mucha información sobre depuradoras, quizás porque se considere un tema muy especializado para ser tratado en la prensa diaria, sí aparece alguna sobre la necesidad de construirlas, así como proyectos de construcción, inventarios sobre las depuradoras que hay y con qué

efectividad funcionan, etc., así como sobre la necesidad de lograr una gestión integral de las basuras. Las gráficas sobre este tema se muestran a continuación.

Nótese que faltan las gráficas correspondientes a los años 1985, 1988 y 1989, que no se adjuntan por las razones que exponemos a continuación: en 1985 y en 1988 no se encontró ningún artículo, mientras que en 1989 se encontró sólo uno.

- 1982
- △ 1983
- ◇ 1984
- × 1986
- + 1987

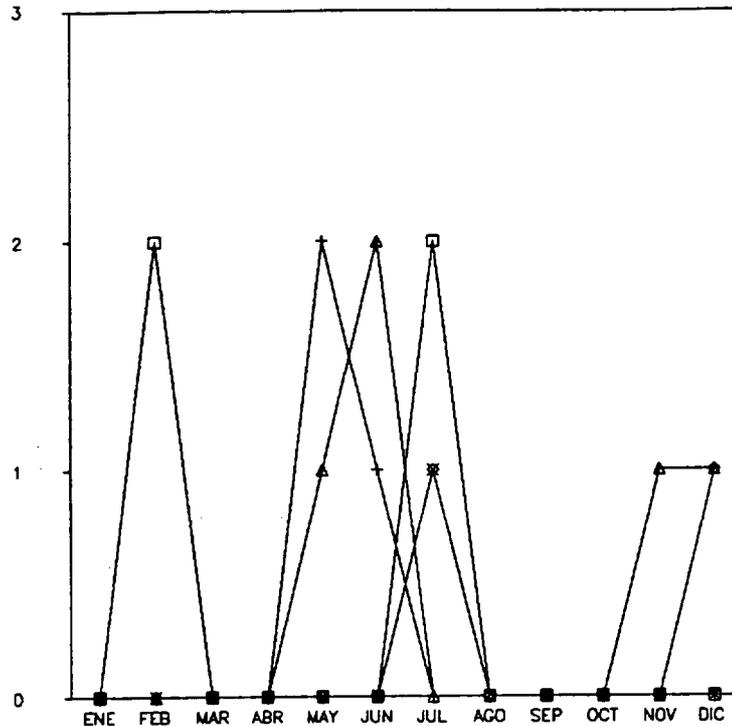


Fig. 17. - Evolución temporal del tema de Depuradoras durante el periodo 1982-1989.

Según datos del MOPU hay actualmente en Gran Canaria veintidós depuradoras. Algunas de ellas llevan bastante tiempo construidas, aunque la mayor parte ha funcionado poco tiempo debido a los altos costes de mantenimiento que llevan consigo, difíciles de soportar por parte de los Ayuntamientos pequeños, cuyos presupuestos obviamente no les permiten contraer este tipo de gastos.

Acerca de estas depuradoras que llevan tiempo construidas y sin funcionar, provocando la protesta de los vecinos, encontramos algunas referencias, como son las siguientes: "*La playa de Bañaderos sigue cerrada*" (3.VII.82. La Provincia); "*En Bañaderos: menos prohibiciones y más soluciones*" (18.VII.82. La Provincia); "*No hay problemas económicos para la depuradora de Bañaderos*" (22.VII.82. La Provincia); "*El emplazamiento de la depuradora de Bañaderos está perfectamente determinado*" (29.VII.82. La Provincia); "*Otra vez la contaminación playera*" (6.VI.83. La Provincia); "*La costa de Bañaderos poco recomendable para bañarse*" (7.VIII.83. La Provincia).

A pesar de todas estas protestas por el estado de la playa y de que la depuradora se terminó en 1988, como vemos en la tabla siguiente elaborada con datos del MOPU, ésta todavía no ha entrado en funcionamiento. El caso de la playa de Bañaderos nos ha servido en esta ocasión como ejemplo, pero representa un hecho habitual en la isla de Gran Canaria.

En la Tabla II.1 se da la localización de las depuradoras de Gran Canaria, así como algunos datos de interés acerca de ellas.

LUGAR	SITUACION	Q PREVISTO (m ³ /día)	FECHA FI- NALIZACION
1. Agaete	Terminada	500	1987
2. Artenara	Terminada		(2)
3. Arucas	Terminada	2000	1988
4. Bañaderos	Terminada	500	1988
5. Barranco Seco	Fase I	17400	
	(Funcionando)		
	Fases I+II	52200	
	(Fase II en construcción)		
6. Firgas	Terminada	500	
7. Gáldar	Funcionando	3000	1988
8. Mogán	En proyecto	150	
9. Moya	Terminada	500	1988
10. San Bartolomé	En contratación	150	
11. San Mateo	Terminada	500	(2)
12. San Nicolás	Funcionando	1000	
13. Sureste	Terminada	6000	1989
14. Tablero	Funcionando	500	1987
15. Tafira	Funcionando ⁽¹⁾	720	
16. Tamaraceite	Funcionando	1400	
17. Tejeda	Terminada	150	
18. Telde			
(Pozuelo)	Funcionando	5000	
19. Telde			
(Gando)	Terminada	500	1987
20. Tenoya	Funcionando	720	
21. Teror	En construcción	500	
22. Valleseco		300	

Tabla II. 1. - Algunos datos de interés sobre las depuradoras de Gran Canaria.

(1) Según el MOPU funciona, según el PIOT no.

(2) Se terminaron entre 1980 y 1983.

Aparte de estas depuradoras, que son municipales, hay otras de carácter privado. Según el Avance del Plan Insular de Ordenación del Territorio (PIOT), hay en la isla trece depuradoras privadas. De ellas las más importantes son las cuatro administradas por ELMASA (que no dice donde están situadas) y las tres ubicadas en Puerto Rico. El resto se encuentran en urbanizaciones pequeñas. Los datos que tenemos acerca de dichas depuradoras se muestran en la Tabla II.2.

LUGAR	CAUDAL (m ³ /día)
Sur (Costa de San Bartolomé)	20.000
Puerto Rico 1	2.000
Puerto Rico 2	1.000
Puerto Mogán	300
Colegio Heidelberg	60

Tabla II.2.- Depuradoras privadas localizadas en Gran Canaria.

Actualmente, se está intentando crear un consorcio entre algunos de estos Ayuntamientos, con el apoyo económico del Cabildo, al menos en la fase inicial, pero con la intención de que lleguen ellas mismas a autogestionarse, mediante la venta del agua que podría ser reutilizada para riego.

Por este motivo, últimamente han aparecido en la prensa local algunos artículos, de los cuales damos cuenta a continuación.

16.III.90. *"La depuradora de aguas residuales ya funciona"* (San Mateo). La Provincia.

La depuradora lleva alrededor de diez años construida, sin que se pueda utilizar por falta de medios económicos. Ahora el Cabildo se compromete a sufragar su mantenimiento si no genera ingresos suficientes para ser autogestionada. Por ahora va a sufragar todos los gastos, y a partir de 1991 lo hará al 50% con el Ayuntamiento.

3.IV.90. *"El pleno se sumó al convenio de las plantas depuradoras"* (Moya). La Provincia.

Dicho convenio consiste en la puesta en marcha y explotación de las plantas depuradoras de Arucas, Moya y Firgas, así como las de Agaete y San Mateo.

4.IV.90. *"Dos depuradoras solucionarán el vertido de aguas residuales"* (Arucas). La Provincia.

Se aprobó el convenio de colaboración con el Cabildo para la explotación de las plantas depuradoras radicadas en varios municipios de Gran Canaria. El Cabildo sufraga los gastos el primer año, y a partir del segundo se hace a partes iguales con el Ayuntamiento.

Estas dos depuradoras pertenecientes al municipio de Arucas están situadas una en Cardones (con una capacidad de 2.000 m³/día) y otra en Bañaderos (con capacidad para 500 m³/día).

16.IV.90. *"La depuradora lleva más de cinco años sin funcionar"* (Artenara). Canarias⁷.

Funcionó durante dos años y medio, pero el agua depurada no se aprovechaba sino que se tiraba barranco abajo. Debido a esto

los gastos de mantenimiento eran mucho mayores que los ingresos, por lo cual no resultaba rentable al Ayuntamiento.

17.V.90. "*Aprobado el proyecto de reutilización de aguas depuradas, valorado en 350 millones*" (Sureste). La Provincia.

Se piensa cubrir con aguas depuradas, no solo procedentes de la zona sino también de Las Palmas, el 70% de la demanda de agua en época de zafra.

17.V.90. "*Cabildo y Ayuntamiento colaboran para crear el consorcio insular de aguas fecales*" (Las Palmas). La Provincia.

Están en negociaciones para crear un consorcio entre todas las depuradoras de la isla, de tal forma que la reutilización de las aguas depuradas permita una total autogestión de éstas. El Ayuntamiento de Las Palmas de G.C. aportaría el 60% del total de aguas depuradas.

24.VI.90. "*La hora del agua depurada*". La Provincia.

Se habla de los usos que se le piensa dar al agua depurada con la puesta en marcha del plan para gestionar las depuradoras conjuntamente.

Los Residuos Sólidos tampoco suponen una gran cantidad de información en la prensa. Además, el tipo de información es parecido al de las depuradoras (la necesidad de que existan plantas de tratamiento, de que desaparezcan los vertederos incontrolados, etc.).

La cantidad de información está bastante condicionada por hechos puntuales. Por ejemplo, a principios de los 80 se hablaba de la necesidad de un plan integral, a nivel de toda la isla, para la gestión de los residuos sólidos. Este plan fue elaborado por el Cabildo de Gran Canaria (Plan Insular de Residuos Sólidos) y en él se considera la isla dividida en tres zonas para la gestión de este tipo de residuos. Una de estas zonas sería el Sureste, donde la planta de tratamiento se encuentra ya construida y está situada en Juan Grande, encargándose de la gestión de las basuras de toda esta zona. Otra estaría constituida exclusivamente por el municipio de Las Palmas de G.C., que se considera que genera suficientes residuos para mantener una planta de este tipo, y la tercera sería la zona Noroeste de la isla.

La planta de Juan Grande fue inaugurada en 1.985, lo cual supuso la aparición de información en estas fechas. Aproximadamente un año después, aparece otra vez información sobre el tema debido a problemas de gestión en la planta, que no absorbe ni la mitad de los residuos previstos, y a problemas económicos en su mantenimiento. Esto ha dado lugar a subidas en las tasas a pagar por los Ayuntamientos que utilizan esta planta, con lo cual algunos de ellos han optado por utilizar vertederos (por supuesto incontrolados) en sus municipios, por lo que el problema no sólo no se ha solucionado sino que en algunos casos incluso se ha agravado.

Hay algunos ejemplos sobre esto, como en Telde donde el Ayuntamiento utiliza un vertedero que ha provocado protestas del de Ingenio, colindante con él, porque le causa importantes molestias. De hecho, con fecha 9.VIII.89 aparece en La Provincia un artículo titulado, "El Ayuntamiento de Ingenio

denuncia el de Telde por presunto delito ecológico"; el 11.VIII.89 aparece en La Provincia, *"Telde tendrá otro vertedero de basura"*; y el 17.V.90 aparece también en La Provincia, *"El Cabildo pide al Ayuntamiento de Telde que vierta sus residuos en Juan Grande"*. Otro caso se ha presentado en el municipio de San Bartolomé de Tirajana, donde el Ayuntamiento ha estado utilizando un vertedero en la zona de Fataga, provocando la protesta de los vecinos que han amenazado incluso con denunciarlo en otros países, con lo que esto implica de perjuicio para una zona que vive casi exclusivamente del turismo. Sobre esto encontramos las siguientes referencias: *"La asociación de vecinos de Fataga denuncia que existe un vertedero ilegal"* (22.X.87. La Provincia); *"Los vecinos de Fataga denunciarán en todo el mundo la quema de basura en la zona turística"* (23.VIII.88. La Provincia); *"La asociación 'Arteara', decidida a eliminar el vertedero de La Degollada en Fataga"* (6.X.88. La Provincia).

En definitiva llegamos a la conclusión de que la previsión es fundamental para lograr una buena gestión de las basuras, lo cual es esencial en cualquier sociedad desarrollada, dada la gran cantidad de residuos que se generan.

Las gráficas sobre este tema se muestran en la página siguiente.

Acerca de Ecología y Playas no se han construido gráficas porque se han incluido artículos muy dispares en estos apartados. Esto significa que su evolución con el tiempo es muy aleatoria y poco interesante a la hora de sacar conclusiones sobre su relación con la opinión pública, al menos en lo que a su evolución temporal se refiere.

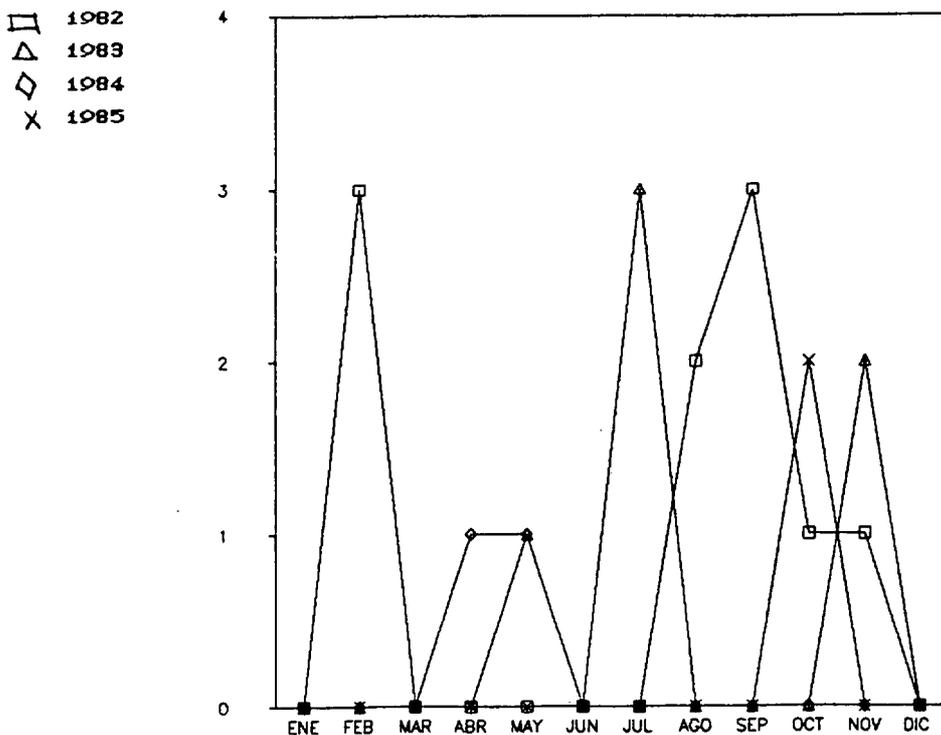


Fig. 18. - Evolución del tema de residuos sólidos durante el periodo 1982-1985.

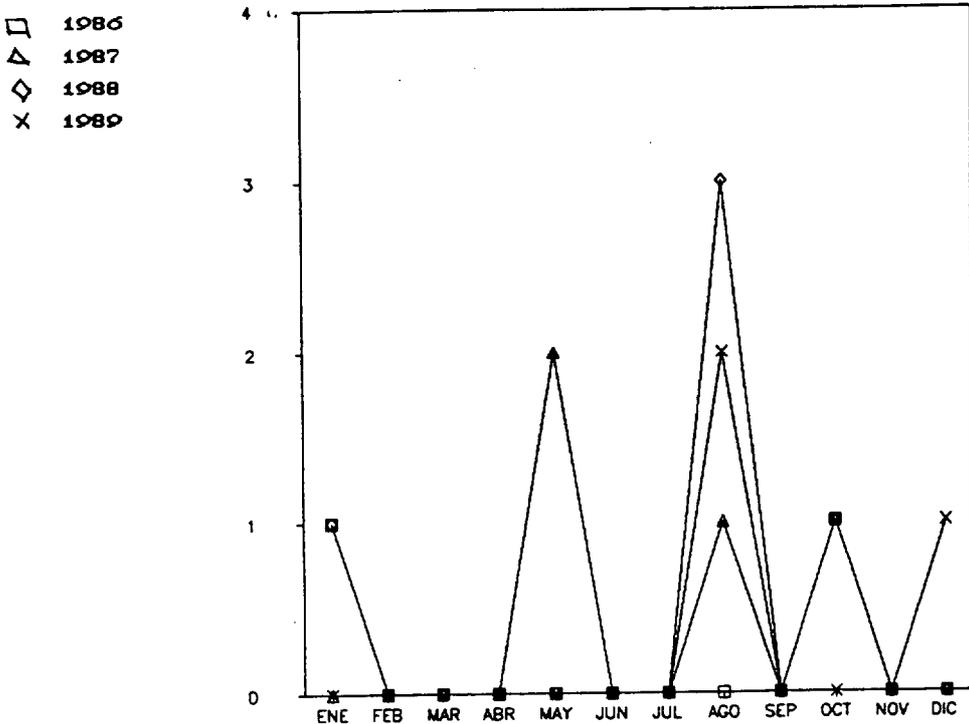


Fig. 19. - Evolución de los residuos sólidos durante el periodo 1986-1989.

III.
EL PROBLEMA DE LA ELIMINACION DE RESIDUOS.

III.1. Introducción: El problema en Gran Canaria.

La eliminación de residuos es un problema importante en cualquier sociedad desarrollada, tanto en lo que se refiere a las basuras o residuos sólidos como a los efluentes o residuos líquidos y a los humos o residuos gaseosos.

La tendencia, en la eliminación de residuos líquidos ha sido hacerlo a través del mar, al menos en las ciudades costeras, y con más razón en una isla, dada la limitada disponibilidad de terreno. A pesar de todo, en Gran Canaria se ha utilizado mucho el tradicional sistema de pozos negros, tanto en las zonas interiores como en las costeras. Pero la escasez de agua ha obligado a la explotación de las aguas subterráneas para el riego, por lo que se ha hecho imprescindible preservar éstas libres de contaminación. Aunque parezca una contradicción, a pesar de ser una isla las actividades de tierra adentro siempre han sido económicamente más importantes que las que miran hacia el mar y, al parecer, se ha preferido salvaguardar la tierra aunque fuera a costa de éste último.

Otro factor a tener en cuenta es que Gran Canaria tiene una densidad de población muy alta, sobre todo en el litoral.

En la Tabla III.1 se muestra la elevada densidad de población de Gran Canaria, en comparación con el resto de las islas.

Y en la Tabla III.6 podemos ver la distribución de la población de Gran Canaria por municipios. Se observa en ella que la mayor parte de la población, como dijimos antes, se localiza en torno al litoral.

ISLAS	SUPERF. (km ²)	POBLACION EN 1981.	DENS. DE POBL. (hab./km ²)
Tenerife	2.036	590.963	290
Fuerteventura	1.662	30.185	18
Gran Canaria	1.532	672.716	439
Lanzarote	862	53.452	62
La Palma	706	72.665	103
La Gomera	373	18.237	49
El Hierro	287	6.408	22

Tabla III. 1. - Densidad de población de las siete islas canarias en 1981 (Estadísticas Básicas de Canarias. 1980-1985. Tomo I).

Podemos observar en esta tabla que la isla con mayor densidad de población es Gran Canaria.

	TOTAL DE SECTORES	SECTORES ECONOMICOS				NO CLASIFICABLES
		AGRICULTURA	INDUSTRIA	CONSTRUCCION	SERVICIOS	
LAS PALMAS	100	7,1	11,8	11,5	59,1	10,6
S.C.TENERIFE	100	9,4	7,2	13,0	61,2	9,2
CANARIAS	100	8,2	9,6	12,2	60,0	9,9
NACIONAL	100	12,4	21,4	8,8	48,9	8,5

Tabla III. 2. - Distribución porcentual de los activos por sectores económicos en Canarias durante el segundo trimestre de 1989 (Boletín Estadístico de Coyuntura. 1989. Tomo II).

El fenómeno de asentamiento preferente de la población en torno al litoral empezó a observarse a partir de los años 60, y ha ido en aumento con el paso de los años hasta llegar a los límites de masificación actuales.

Hasta esta fecha la economía de la isla se basaba principalmente en la agricultura y en la ganadería, pero se empezaban a desarrollar otros sectores que han marcado nuestra evolución económica. Estos sectores han sido fundamentalmente el turístico y también el Puerto de la Luz, que se ha desarrollado como punto de escala casi obligatorio en el tráfico marítimo a través del Atlántico (Quintana, 1985).

En la Tabla III.2 podemos observar que la mayor parte de la población activa de Las Palmas se encuentra empleada en el sector servicios, en una proporción bastante mayor que la media nacional. En lo que se refiere a la agricultura, el porcentaje de población empleada está por debajo de la media regional lo cual quiere decir que la mayor parte de la producción agrícola se genera en la provincia de Santa Cruz de Tenerife. Si comparamos con la media nacional vemos que a pesar de que el porcentaje de población empleada en este sector es más bajo en Canarias, las diferencias no son muy grandes teniendo en cuenta la baja producción agrícola de Canarias. En el sector industrial, sin embargo, la media de empleo en Canarias es bastante menor que la nacional, ya que tenemos pocas industrias establecidas y las que hay no son demasiado importantes (Ver Tabla III.3). En construcción, la población empleada es bastante superior a la media nacional, lo cual es una prueba del gran auge que ha tenido la construcción en Canarias, hasta el punto de haberse convertido en uno de los sectores económica-

mente predominantes de las islas, junto con los servicios, ambos en relación directa con el turismo.

En las Tablas III.3 y III.4 mostramos la distribución de la población empleada en la industria según sectores, tanto en Canarias como a nivel nacional.

Podemos ver en ellas que en Canarias hay muy pocas industrias establecidas y, por tanto, no es el sector más importante para la economía de las islas. En consecuencia, como vemos en la Tabla III.2, la población empleada en este sector es muy poca.

Además, podemos ver que la cantidad de población empleada en la industria ha ido disminuyendo cada año. Esto puede haber sido motivado por un traspaso hacia otros sectores de producción, así como por la utilización de menos mano de obra como consecuencia de la mecanización. Lo que parece evidente es que en muchos sectores la producción industrial no sólo no ha disminuido sino que incluso ha aumentado, como por ejemplo en todo lo que se refiere a la producción de energía, así como producción de plásticos, envasados, industrias alimenticias, etc...

Los cambios en la economía de la isla dieron lugar a un notable trasvase de población desde las comarcas tradicionalmente agrícolas hacia la costa, fenómeno que se produjo incluso dentro de un mismo municipio. También se registró en ese periodo un movimiento migratorio bastante evidente hacia Gran Canaria, tanto desde otras islas como desde la Península e incluso del extranjero.

En la Tabla III.5 se muestra la evolución de la población de Gran Canaria en comparación con la del resto de las islas, desde principios de siglo.

La evolución de la población de Gran Canaria, por municipios, la podemos ver en la Tabla III.6.

CNAE	Canarias							
	Personas ocupadas				Costes de personal (000 000 ptas)			
	1980	1981	1982	1983	1980	1981	1982	1983
Energía	3 610	3 568	3 513	3 443	6 415	7 403	8 618	9 561
Agua	1 050	1 093	1 102	960	1 005	1 216	1 405	1 705
Minerales metálicos	—	—	—	—	—	—	—	—
Producción y primera transformación de metales	—	12	21	30	—	11	52	39
Minerales no metálicos y canteras	302	356	371	324	130	199	259	238
Industria productos minerales no metálicos	2 938	2 599	2 485	2 625	2 163	2 418	2 588	3 059
Industria química	751	725	595	583	705	842	704	839
Fabricación de productos metálicos	1 722	1 489	1 377	1 327	1 067	980	1 022	1 003
Maquinaria y equipo	410	363	309	400	269	311	309	402
Materiales eléctricos y electrónico	299	364	214	325	222	282	195	339
Materiales de transporte	533	632	619	772	534	532	603	1 013
Alimentos, bebidas y tabaco	13 475	12 839	11 560	12 748	9 956	11 310	12 057	15 252
Industria textil y de la confección	413	429	302	408	167	208	133	193
Calzado y cuero	74	67	73	63	41	41	52	43
Madera, corcho y muebles	2 766	2 545	3 553	3 206	998	1 114	1 603	2 050
Papel, artículos de papel, artes gráficas y edición	2 159	2 044	2 130	2 166	1 947	2 149	2 510	2 969
Transformación del caucho y materias plásticas	—	—	—	—	—	—	—	—
Otras industrias manufactureras	304	237	154	153	220	199	150	126
Total industria	31 582	30 628	29 163	30 262	26 303	29 835	33 114	39 912

Tabla III. 3. - Principales características de la encuesta industrial en Canarias según grupos de actividad (CNAE). 1980-1983 (Estadísticas Básicas de Canarias. 1980-1985. Tomo II).

CNAE	Nacional							
	Personas ocupadas				Costes de personal (000 000 ptas)			
	1980	1981	1982	1983	1980	1981	1982	1983
Energía	126 754	128 431	130 715	130 651	186 609	222 543	264 900	306 075
Agua	26 760	28 702	28 609	28 610	18 502	24 653	27 921	30 727
Minerales metálicos	9 550	9 452	8 083	8 976	10 717	12 626	13 028	15 317
Producción y primera transformación de metales	113 498	106 598	101 297	99 846	147 399	158 216	171 374	189 413
Minerales no metálicos y canteras	28 471	27 577	26 748	24 713	20 257	23 999	26 500	28 178
Industria de productos minerales no metálicos	179 252	168 505	149 673	135 785	152 533	168 647	169 767	175 277
Industria química	137 761	132 391	129 402	121 876	161 002	189 935	202 636	215 241
Fabricación de productos metálicos	294 633	279 540	254 557	250 181	247 326	274 193	285 509	311 837
Maquinaria y equipo	152 591	139 032	127 709	121 416	148 754	155 416	163 690	178 377
Materiales eléctricos y electrónico	155 403	143 963	140 134	134 799	167 023	175 412	196 045	209 588
Materiales de transporte	241 672	227 053	225 432	224 668	271 522	294 154	326 554	363 377
Alimentos, bebidas y tabaco	393 850	377 569	334 173	354 505	279 139	309 241	302 809	377 677
Industria textil y de la confección	300 901	267 431	240 836	236 282	205 523	203 609	213 722	231 946
Calzado y cuero	87 467	75 770	63 922	58 575	61 628	61 671	58 821	61 011
Madera, corcho y muebles	209 514	189 564	167 364	163 528	121 744	121 723	118 467	128 957
Papel, artículos de papel, artes gráficas y edición	127 830	130 252	123 029	115 688	120 435	138 399	150 837	164 488
Transformación del caucho y materias plásticas	—	—	—	—	—	—	—	—
Otras industrias manufactureras	97 794	92 596	84 687	89 079	90 955	93 203	106 843	123 777
Total industria	2 715 699	2 553 245	2 362 242	2 325 438	2 435 128	2 654 093	2 824 086	3 122 427

Tabla III. 4. - Principales características de la encuesta industrial según grupos de actividad a nivel nacional (CNAE). 1980-1983 (Estadísticas Básicas de Canarias. 1980-1985. Tomo II).

Islas	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1981
Lanzarote	17.556	19.436	21.516	22.430	27.476	29.985	34.818	41.912	53.452
Fuerteventura	11.669	10.613	11.305	11.708	13.173	13.517	18.138	18.192	30.185
Gran Canaria	127.471	162.601	173.552	216.853	279.875	331.725	400.837	519.606	672.716
Tenerife	138.008	180.307	176.998	218.877	261.817	317.727	387.767	500.381	590.963
La Gomera	15.358	18.480	20.485	25.405	28.571	28.383	27.790	19.339	18.237
La Palma	41.994	45.752	46.582	51.784	60.533	63.809	67.141	65.291	72.665
El Hierro	6.508	6.827	7.225	8.071	8.849	8.182	7.957	5.503	6.408
TOTAL CANARIAS	358.564	444.016	457.663	555.128	680.294	793.328	944.448	1.170.224	1.444.626
TOTAL NACIONAL	18.594.405	19.927.150	21.303.162	23.563.867	25.877.971	27.976.755	30.430.698	33.823.918	37.616.947

Tabla III. 5. - Población de hecho de Canarias según los censos oficiales de 1.900 a 1.981, por islas (Estadísticas Básicas de Canarias. 1980-1985. Tomo I). Podemos observar en esta tabla que la población de Gran Canaria es la que más rápidamente ha aumentado, sobre todo a partir de los años 60.

	1.960	1.970	1.975	1.981	1.986
AGAETE	5.117	4.438	4.436	4.457	5.136
AGÜIMES	10.419	12.010	12.411	13.801	14.471
ARTENARA	1.859	1.325	1.243	1.046	1.073
ARUCAS	27.713	24.096	24.865	25.827	27.025
FIRGAS	4.818	5.275	5.065	5.351	5.658
GALDAR	16.456	17.302	18.186	18.830	20.689
INGENIO	10.782	15.229	17.854	20.624	21.224

MOGAN	5.357	4.919	5.871	6.608	7.625
MOYA	10.271	8.096	7.395	7.516	7.869
LAS PALMAS	192.088	263.407	327.489	360.098	349.423
SAN BARTOLOME	12.406	12.581	14.873	17.739	25.821
SAN NICOLAS DE T.	7.447	7.783	7.812	7.454	7.688
STA. BRIGIDA	8.777	10.453	10.486	11.219	12.642
STA. LUCIA	10.635	18.698	23.185	26.628	30.268
STA. M. DE GUIA	12.586	11.658	11.647	12.160	12.713
TEJEDA	4.477	2.837	2.300	2.314	2.135
TELDE	32.137	43.316	52.188	62.509	73.847
TEROR	10.069	8.705	9.413	9.520	10.516
VALSEQUILLO	6.285	6.080	5.928	6.171	5.950
VALLESECO	5.446	4.468	4.686	4.006	4.203
VEGA DE SAN MATEO	9.415	7.205	6.842	7.059	7.183
TOTAL	404.581	489.981	574.175	631.037	653.159

Tabla III. 6. - Evolución de la población de la isla de Gran Canaria a partir de 1.960 por municipios (Datos del Avance al Plan Insular de Ordenación del Territorio PIOT).

Podemos observar en la Tabla III.6 que en los municipios de Agaete, Artenara, Moya, La Aldea, Teror, Tejeda, Valsequillo, Valleseco y San Mateo disminuyó la población a partir de 1.960. Se trata, en todos los casos, de zonas agrícolas y, a excepción de Agaete y La Aldea, de zonas interiores. Moya posee una parte costera, aunque la mayor parte de su territorio es interior.

Sin embargo, en Mogán y San Bartolomé la población ha aumentado mucho, sobre todo entre 1.970 y 1.981, debido al importante desarrollo turístico que han tenido, sobre todo San Bartolomé ya que Mogán se ha desarrollado fundamentalmente en la década de los 80. Esto contrasta con el hecho de que a principios de los 60 eran de los municipios menos poblados, sobre todo Mogán, que era el que tenía menos habitantes de toda la isla. Hay que tener en cuenta también que en ambos la población de hecho es mucho mayor que la de derecho y, por tanto, su población real debe superar a la que muestran las estadísticas.

En el caso de Gáldar y Arucas, la población se ha mantenido más o menos estable, con variaciones que están dentro de la lógica en el desarrollo de cualquier municipio, pero sin grandes explosiones demográficas. Esto se debe a que se han desarrollado, sobre todo Arucas, como ciudades dormitorio.

En los municipios del Sureste (Agüimes, Ingenio y Santa Lucía) aunque no se ha dado el fenómeno del desarrollo turístico proyectado internacionalmente, sí se ha registrado un movimiento importante de turismo local, que procedente de distintos puntos de la isla pasa los veranos en esta zona. También se utiliza como residencia de mucha gente que trabaja en la zona turística del Sur.

Las zonas litorales se han visto por tanto sometidas a una presión para la que ni estaban preparadas ni fueron acondicionadas a posteriori. Esta presión se refiere a la ordenación de los espacios cercanos a la costa y a todo lo que esto lleva aparejado en cuanto a servicios complementarios.

El aspecto que nos ocupa en este trabajo es exclusivamente la gestión y eliminación de los residuos a que la sobreutilización de la costa da lugar. En este sentido, el mar ha sido siempre utilizado como receptor final de los desechos de la tierra, los cuales ha absorbido mientras ha podido. Sin embargo, una gran parte de los desechos de hoy no pueden ser degradados por los procesos naturales que ocurren en el mar, debido a varias razones; destacamos las siguientes:

a.- Se vierte más cantidad de residuos y en concentraciones mayores de las que los ecosistemas litorales pueden asimilar.

b.- El origen de los residuos es un factor fundamental en lo que a su degradación por parte del medio marino se refiere. Si son de origen doméstico se pueden eliminar por vía marina manteniendo las condiciones adecuadas. En cambio, si son de origen industrial el problema se complica, porque este tipo de residuos contiene elementos (como metales pesados, aceites, etc.) cuyas características dificultan en algunos casos, e impiden en otros, su degradación o disolución en el mar y, por tanto se van acumulando, pudiendo llegar a niveles superiores a los que el normal funcionamiento del medio puede tolerar. Si se trata, por ejemplo, de lodos procedentes de depuradoras, se pueden ocasionar importantes perjuicios al mar.

c.- La degradación a la que han sido sometidos los ecosistemas litorales, debido a la sobreexplotación, a la construcción de todo tipo de instalaciones en la costa (puertos comerciales y deportivos, instalaciones para el ocio, etc...) y otras razones, ha supuesto una excesiva presión sobre las cadenas tróficas de estos ecosistemas, que no funcionan a un máximo de efectividad, pues entre otras cosas se ha reducido su diversidad, predominando las especies oportunistas, especializadas en funciones muy concretas.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que en Gran Canaria la mayor parte de los residuos son de origen doméstico y, por tanto, se pueden eliminar por vía marina sin causar un daño irreparable, siempre que se impongan unas condiciones adecuadas.

De hecho, en Canarias hay muy pocas industrias establecidas (como se ve en las Tablas III.3 y III.4) si comparamos con las que hay a nivel nacional. En la Tabla III.2 se muestra el bajo porcentaje de población empleada en la industria en Canarias. Todo esto demuestra que la cantidad de residuos de origen industrial es baja y que una gestión bien planificada podría evitar los problemas de su eliminación a través del mar.

En la eliminación de residuos por vía marina juegan un papel preponderante los siguientes factores:

a. Tratamiento previo. Es conveniente siempre someter a los residuos que se vayan a eliminar por vía marina al menos a un tratamiento previo, ya que así se degradan mejor y más rápidamente al eliminarse por lo menos una parte de la materia

en suspensión. De todas formas es aconsejable llegar como mínimo a un tratamiento secundario. Lo ideal es alcanzar una eliminación superior al 85% tanto en cuanto a la DBO como a los sólidos en suspensión. Se ha dado como valor standard, por tener una referencia general, alcanzar menos de 200 coliformes por 100 ml., pero actualmente se prefiere definir el número de coliformes a nivel individual.

El caso de industrias como talleres de coches, industrias de la pintura e industrias alimenticias, por nombrar algunas de las que se encuentran en Gran Canaria, hay que analizarlo aparte. En este caso, los residuos no se deberían eliminar a través de la red general de alcantarillado porque no se pueden tratar de la misma forma que los de tipo doméstico y lo que hacen es dificultar la degradación de estos últimos.

b. Elección de la zona de vertido. La elección, control y gestión del área apropiada para eliminar el vertido deben estar integrados de manera que se adapten perfectamente a las necesidades de la zona. Debemos tener en cuenta que no siempre la dilución es la solución (O'Kane, 1988); algunas veces, al utilizar la dilución como solución al problema de un vertido, se corre el riesgo de que éste alcance un área mayor y, por tanto, perjudique a un mayor número de personas que si se mantuviera el efluente dentro de un área limitada. Esto depende de la calidad y cantidad de vertido, así como del área en el cual se elimine. Si se trata de una zona de cultivos, recreo, etc... podría ser mejor restringirlo y controlarlo dentro de una zona concreta de manera que no llegue a esa zona protegible, y no cause, en consecuencia, ningún impacto negativo, ni estético

ni hacia la calidad de la zona. Sin embargo, si se desea alcanzar concentraciones bajas en la zona de eliminación del efluente de forma más o menos rápida, entonces puede ser mejor elegir la dilución como solución adecuada, de tal forma que el vertido sea asimilado rápidamente por el medio.

III.2. Modelos para la gestión ambiental.

III.2.1. Consideraciones generales acerca de su construcción y aplicación.

Los modelos de calidad de un medio se han convertido en importantes herramientas de trabajo para los técnicos o gestores del medio ambiente en los últimos años. El aumento de la conciencia pública en temas relacionados con el deterioro del ambiente, así como la introducción de una legislación para el control de esta situación y el importante avance de las técnicas de computación han hecho que la precisión de estos modelos haya aumentado mucho. Sin embargo, las dificultades tanto en la construcción como en la aplicación de estos modelos siguen siendo muchas y de diversos tipos. Aquí nos vamos a centrar en los modelos relativos a la eliminación de residuos en la hidrosfera.

En primer lugar, la mayor parte de los estudios se han llevado a cabo en ríos, sistemas que presentan evidentes diferencias con el mar. Los problemas de calidad de ríos se deben fundamentalmente a dos factores: su hidrología natural y la utilización tanto de la tierra circundante como de los recursos hidrológicos por parte del hombre. En este sentido, sobre todo

en lo que se refiere a la segunda de las razones, se pueden encontrar muchas similitudes con el mar.

La interacción entre estos factores puede dar lugar a una importante variedad de modelos.

Hay que tener en cuenta que las dificultades de absorción de sustancias externas son, en general, mucho más insalvables en un río que en el mar, por ser el río un medio físicamente más limitado que el mar. Esto, por supuesto, depende de muchos factores entre los que cabe destacar la cantidad y calidad de residuos. Un ejemplo de la polución que se puede provocar en un medio es la importante contaminación industrial de algunos ríos del Norte de Europa. Esto, y el hecho de que hasta hace relativamente poco tiempo el mar fuera capaz de absorber en gran medida los residuos que se eliminaban hacia él, es lo que ha impulsado la investigación relacionada con los modelos de calidad de ríos (RQMs). En el momento actual, sin embargo, nos encontramos en un punto en el cual el mar está sufriendo las consecuencias de la acción del hombre, razón por la cual se está impulsando la investigación acerca de modelos de aplicación en él. Los RQMs se pueden utilizar, en algunas ocasiones, como punto de partida.

Es difícil seleccionar un modelo que se adapte completamente a una situación de la naturaleza. La necesidad de acomodarse a uno de los tipos preestablecidos (Modelos de Investigación/Gestión; Estocásticos/Deterministas; Dinámicos/Estables; Mecánicos/Caja Negra; "Jerárquicos"; etc...) hace más difícil esta fase inicial. Lo ideal sería adecuar un modelo a las necesidades de una situación y no al contrario, que es lo que se hace habitualmente. Hay otros condicionamientos que jue-

gan un importante papel en esta fase, y estos son fundamentalmente de tipo económico. La posibilidad de aplicar algún modelo que esté disponible, con las mejoras y variaciones que precise, supone un ahorro en tiempo y dinero, que es una consideración con suficiente peso para tener en cuenta a la hora de tomar la decisión de construir un nuevo modelo.

Aunque sea técnicamente posible desarrollar un modelo sobre la calidad de un medio teniendo en cuenta todos los componentes relevantes del sistema, la tendencia, dadas las dificultades encontradas, es desarrollar modelos para problemas específicos. Algunos autores han sugerido que debería haber una "jerarquía" o "escala" en estos modelos de calidad del medio, en relación con el factor para el cual se quiere examinar el esquema o propósito. Tal secuencia en la modelización permite ir seleccionando opciones, de tal manera que se estudien en detalle sólo las soluciones que se acerquen a las óptimas. También existen métodos automáticos de generación de modelos, por ejemplo el paquete integrado STELLA (Cronk et al., 1990).

Los modelos de planificación, que constituyen la primera fase en la aplicación de dicha escala, pueden evaluar un gran número de programas de inversión potencial, casi siempre relacionados con el impacto ambiental y la predicción de costes. Los modelos intermedios permiten una evaluación más detallada de las opciones de planificación y están relacionados con la forma en que el medio pueda "reaccionar" a un plazo más largo. En cuanto a los modelos operativos, que constituyen la última fase de la secuencia, se utilizan para la gestión diaria del sistema. Con datos del presente y del pasado, el modelo se puede utilizar para predecir el estado del sistema en un futuro

cercano. La predicción a medio y largo plazo es un problema de características totalmente diferentes, que corresponde al estudio de procesos caóticos (ver Pacheco, 1990).

La complejidad de un modelo aumenta al disminuir el número de soluciones alternativas que se estudien. Hay tres factores fundamentales que influyen en ello, y son los siguientes:

- a.- El número y tipo de parámetros de calidad que se considere.
- b.- La variación temporal de las entradas al sistema y de los factores exógenos (por ejemplo la calidad y cantidad de la descarga , o las medidas de opinión pública en relación a ellos).
- c.- La simulación del régimen de flujo que se considere.

Y son precisamente estos tres componentes los que marcan la diferencia entre los distintos tipos de modelos.

Algunos autores han mostrado en un diagrama el aumento de complejidad en base a los parámetros, en este caso de tipo bioquímico, que se introduzcan en el modelo. Este esquema lo podemos ver en la Fig.1. Observamos que la complejidad varía desde la simple representación de un balance de masas para elementos conservativos, pasando por modelos simples de DO (Oxígeno disuelto), hasta llegar a la complicada modelización de procesos de eutrofización.

El requerimiento de datos es directamente proporcional a la complejidad del modelo.

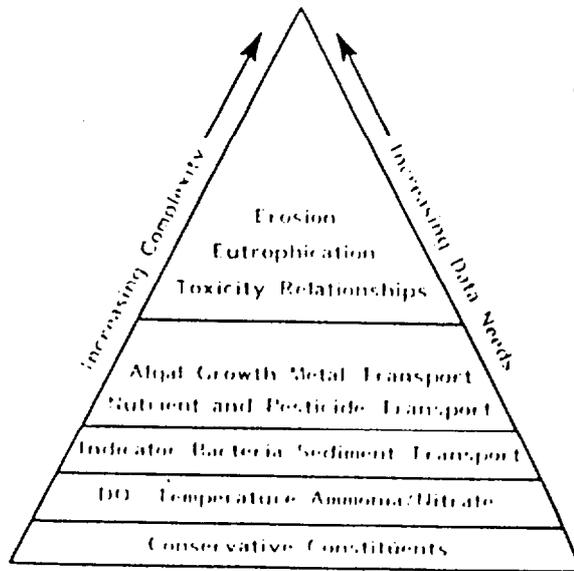


Fig. 2. Relative difficulty of applied modelling (after Hines et al.)

Fig. 1. - Dificultad relativa en la aplicación de modelos (Crabtree et al., 1. 1987).

Diagramas similares se pueden realizar para el resto de los componentes del sistema.

En toda modelización hay tres fuentes habituales de error, que pueden afectar a la precisión de las predicciones y que, por tanto, hay que tener presentes al aplicar un modelo. Estas son, (i) las simplificaciones del modelo en relación con el sistema que representa; (ii) las técnicas de resolución numérica que se utilicen (no tienen los mismos problemas, por ejemplo, los modelos que llegan a soluciones analíticas que los que utilizan técnicas de resolución en elementos finitos, que pueden presentar problemas de estabilidad y dispersión numérica); (iii) la imprecisión de los datos de entrada (utilizar datos insuficientes e inadecuados es a menudo el factor que más influye en los costes y beneficios de un modelo).

En definitiva, a la hora de aplicar un modelo hay que

tener en cuenta varios factores, como son: selección e idoneidad del modelo, requerimiento de datos, costes del modelo, precisión, facilidad de aplicación, etc... El "peso" de cada uno de ellos varía con cada aplicación, y la elección final se hará en función del balance entre los costes potenciales y los posibles beneficios.

Algunos autores han propuesto una guía para la selección y uso de modelos, que se muestra en la Tabla III.7. Los criterios expuestos en ella son siempre susceptibles de ampliación.

- (A) *Define the problem and determine:*
 - (i) What questions need to be answered.
 - (ii) What information is required.
 - (iii) What information is readily available.
 - (iv) What is the required level of precision and accuracy or degree of confidence in the results.
 - (v) Identify what modelling and control options are available.
- (B) *Apply an appropriate model (the simplest that can provide the answers):*
 - (i) Select or develop a model that fits the problem, not a problem that fits a model.
 - (ii) Use the least sophisticated model that will provide the required level of accuracy.
 - (iii) Do not confuse model complexity with accuracy or precision.
 - (iv) Question whether increased accuracy is worth the commensurate increase in effort and cost.
 - (v) Assess model sensitivity.
- (C) *Evaluate the results and implications of the predictions produced by the model:*
 - (i) Consider the implications of any modelling assumptions.
 - (ii) Consider the implications of the degree of confidence in the results.
 - (iii) Assess the value of the results.
 - (iv) Reassess, in the light of the results, the suitability and relative significance of the available options.
 - (v) Identify any further possible course of action or new options.
- (D) *Make recommendations or decisions.*

Tabla III.7. - Criterios para la selección y aplicación de modelos (Crabtree et al., 1.987).

III.2.2. Algunos ejemplos de modelos que se han utilizado en estudios de calidad de un medio.

A) El modelo de Tung y Harthorne.

Desde el año 1.925 en el cual Streeter y Phelps desarrollaron su ecuación, se han aplicado diferentes modelos para la gestión o planificación de la calidad del medio. La ecuación de Streeter-Phelps, a pesar de ser bastante simple, ha servido de base o punto de partida de muchos trabajos, como veremos más adelante.

Para realizar un estudio ideal acerca del impacto de un vertido, se debe llevar un control de la calidad del medio antes y después de que éste sea realizado. Los parámetros de control más frecuentes son la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la concentración de oxígeno (DO), o bien el déficit de oxígeno disuelto (D), que también se utiliza en algunas ocasiones. Si estos parámetros se mantienen dentro de unos límites preestablecidos indican que la calidad del medio es adecuada. Estos límites se deben definir, como ya hemos dicho, para cada zona mejor que en términos generales, pues en este último caso los valores pueden variar dentro de un rango tan extenso que el control local puede no ser del todo adecuado.

Algunos autores (Tung y Harthorne, 1989) han definido punto crítico, o en sentido más amplio localización crítica, como aquella región en la cual el déficit de oxígeno disuelto es máximo, al considerarse el DO como el parámetro que indica la calidad del agua y, por tanto, su déficit máximo indicaría un deterioro en la calidad del medio.

El punto crítico se puede definir de varias formas:

- 1.- Localización con la menor DO esperada.
- 2.- Localización en la cual la varianza del déficit de DO es máxima.
- 3.- Localización con mayor probabilidad de incumplir calidades de agua standard.
- 4.- Localización con mayor probabilidad de ser crítica.

Nótese que en todos los casos la definición se enuncia en términos estadísticos, lo cual indica el carácter de proceso estocástico dado a esta formulación del problema.

La localización con menor concentración de DO esperada se halla de forma determinista a partir de la ecuación de Streeter-Phelps (Ec. 1), obteniéndose así un punto crítico promedio, ya que se toman en el modelo valores medios de los parámetros.

Este modelo se formula en función del déficit de oxígeno disuelto (D) y se obtiene al final el punto crítico (X_c), siendo el resto de parámetros los siguientes:

K_d es el coeficiente de desoxigenación (día^{-1});

K_a es el coeficiente de aireación (día^{-1});

x es la distancia desde la fuente de DBO;

U es la velocidad media de la corriente;

D_x es el déficit de DO a una distancia x del punto de descarga (mg/l);

D_0 es el déficit inicial de DO;

L_0 es la concentración de DBO dentro de la corriente.

La ecuación de Streeter-Phelps para el déficit de oxígeno es la siguiente ecuación diferencial lineal de primer orden:

$$\frac{dD}{dt} = K_d L - K_a D \quad (1)$$

Resolviendo la ecuación y sustituyendo t por x/u , se obtiene lo siguiente:

$$D_x = \frac{K_d L_0}{K_a - K_d} \left[\exp\left(-\frac{K_d x}{U}\right) - \exp\left(-\frac{K_a x}{U}\right) \right] + D_0 \exp\left(-\frac{K_a x}{U}\right) \quad (2)$$

Para hallar el máximo, ya como una función espacial, de D derivamos con respecto a x e igualamos a 0. Obtenemos, así, el punto en el cual el déficit de D_0 es máximo (punto crítico).

Es decir,

$$X_c = \left(\frac{U}{K_a - K_d}\right) \ln\left(\frac{K_a}{K_d} \left(1 - \frac{(K_a - K_d) D_0}{K_d L_0}\right)\right) \quad (3)$$

Sin embargo, esta manera de determinar el punto crítico no es muy precisa; al ser la corriente un proceso aleatorio, los valores de los parámetros no permanecen constantes en el espacio ni en el tiempo, por lo cual al estimarlos como medias se comete un error importante.

Para evitar estas incertidumbres se han utilizado propiedades estadísticas, distribuciones de probabilidad y correlaciones entre los parámetros de las ecuaciones. Es decir, en vez de determinar el punto crítico como tal se puede determinar una función de densidad de probabilidad del punto crítico, que nos permite saber en qué zona o región hay mayor probabilidad

de localizar dicho punto. Esto se puede ver esquemáticamente en las Figuras 3 y 4.

En cuanto al segundo criterio, la localización cuya varianza en el déficit de DO es máxima es aquel punto donde la incertidumbre del déficit de DO es máxima. El punto en el que esto ocurre se considera crítico por tener una alta probabilidad de incumplir un DO standard. También se podría estimar el punto con mínimo DO esperado, pero éste no tiene por qué representar la mayor amenaza hacia calidades de agua standard, ya que el hecho de que el DO sea mínimo no significa que tenga que ser una amenaza para el medio, pues puede no estar por debajo de niveles preocupantes. Esto en todo caso es diferente, como dijimos antes, para cada caso particular.

La localización con mayor probabilidad de incumplir un DO standard se halla mediante una aproximación de la probabilidad acumulada de la variable, llegándose al final a la conclusión de que dicha probabilidad viene dada por:

$$\Pr (D_x > D_{std}) = 1 - F (W_{std})$$

Es decir,

$$\Pr (D_x < D_{std}) = F (W_{std})$$

donde,

$$W_{std} = \frac{D_{std} - D(D_x)}{\text{Var} (D_x)}$$

$F(w)$ es la probabilidad acumulada de la variable estandarizada w , y W_{std} es el D_x permitido.

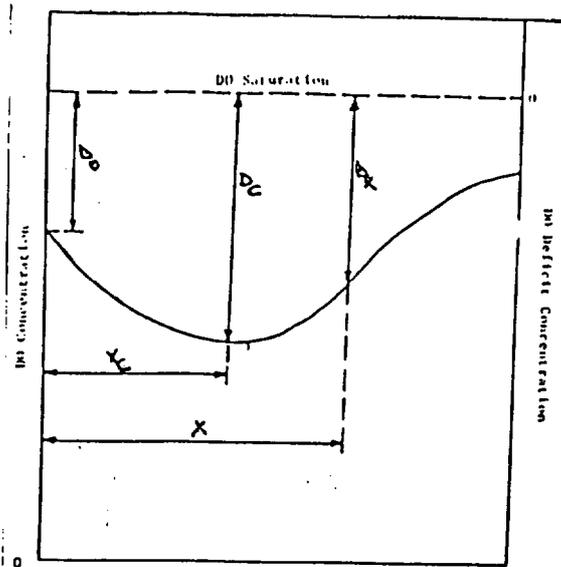


Fig. 1. Typical dissolved oxygen sag curve.

Fig. 2. - Curva típica para el Oxígeno disuelto.

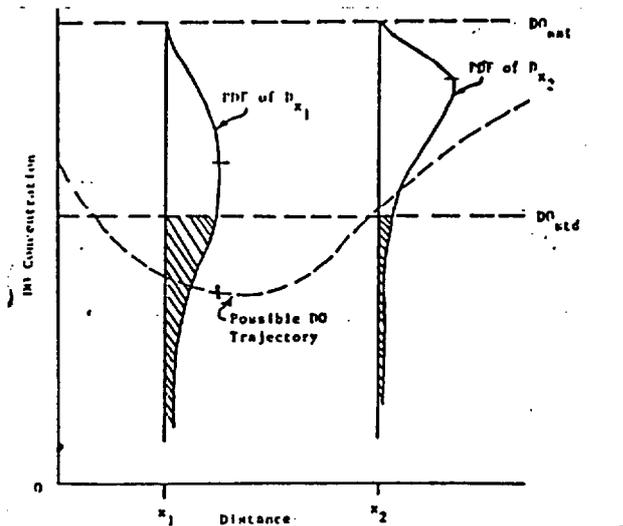


Fig. 2. Schematic diagram of the probability density function for the DO deficit.

Fig. 3. - Diagrama esquemático de la función de densidad de probabilidad para el déficit de DO.

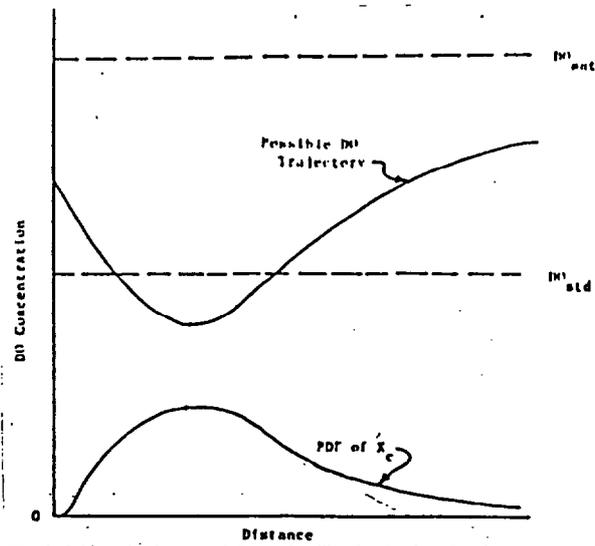


Fig. 3. Schematic diagram of the probability density function for the critical location.

Fig. 4. - Diagrama esquemático de la función de densidad de probabilidad para la localización crítica.

En cuanto al punto con mayor probabilidad de ser crítico, éste sería la moda de la distribución. Se puede hallar la moda localizando el punto en el cual la ordenada de la función de densidad de X_c (punto crítico) es máxima. La moda de la distribución se halla a partir de la expresión (3).

Desde un punto de vista práctico, los criterios más importantes son (3) y (4). $X_c^{(4)}$ y $X_c^{(3)}$ tienen la ventaja de la simplicidad en los cálculos. El método más sencillo, tanto desde un punto de vista teórico como práctico, es $X_c^{(3)}$ (máxima probabilidad de incumplir un DO standar).

B) El problema de las localizaciones críticas.

La localización crítica merece una atención especial tanto en cuanto a protección de alguna zona, evitándose así con suficiente antelación un deterioro de su calidad, como en lo que se refiere a ahorros de gestión, teniendo en cuenta lo que hay que invertir en medios técnicos, económicos y humanos para recuperar una zona que no se ha protegido previamente. Otro factor a tener en cuenta es que una zona que ha sufrido algún deterioro es difícilmente recuperable y, por supuesto, nunca recobrará su calidad inicial intacta.

El modelo de Tung y Harthorne para ríos presenta dificultades en su extensión al mar o a cuerpos de agua de otras características. En particular, la extensión a 2 ó 3 dimensiones no está clara, pues el análogo de la ecuación de Streeter-Phelps puede seleccionarse de muy diversas formas. La más simple, en sólo 2 dimensiones, consistiría en tener en cuenta sólo

la advección causada por corrientes, dando un modelo del tipo advección-reacción:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = v \cdot \text{grad } D - K_a D + K_d L$$

En esta ecuación el campo de velocidades v debe ser determinado previamente, o actualizado de modo permanente al poner en marcha el modelo. Ya se apunta aquí que esta es la forma general de un modelo de calidad de aguas, en una versión especial, pues no se ha incluido la difusión. Esta puede añadirse y se tiene la ecuación general de advección-difusión-reacción:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = v \cdot \text{grad } D - K \nabla^2 D + f(D)$$

Un tratamiento análogo al realizado para el caso de Streeter-Phelps supondría la resolución previa por métodos numéricos (hecho ya habitual en los estudios de contaminación) de algunas de estas ecuaciones, resultando así que no hay especial interés en llevar a cabo esa analogía, al menos en principio. Sin embargo, la idea de considerar el fenómeno como un sistema aleatorio o estocástico será retomada más adelante y desarrollada en su integridad para un problema relacionado: El cálculo de tiempos de eliminación de partículas contaminantes.

El modelo que acabamos de exponer constituye un ejemplo de lo que apuntábamos en el apartado anterior acerca de construir una jerarquía cuando se hace un modelo. Se parte de un modelo sencillo y se van añadiendo variables, pudiéndose aumen-

tar la complejidad tanto como se quiera, con todas las ventajas e inconvenientes que esto supone. En este caso partimos de la ecuación de Streeter-Phelps, que es un sencillo balance de masas; luego, introduciendo un término de variación en el espacio debido a la velocidad, se pasa al modelo de advección-reacción; y, por último, se añade un término que modelice la difusión, quedando un modelo de advección-reacción-difusión.

C) Otros ejemplos de modelos sobre calidad de medios.

Se ha definido, por otra parte, la profundidad óptima de descarga (Gabric, 1986) como aquella en la cual el impacto de un vertido sobre el medio biótico sea mínimo. Si se considera la dilución como solución al problema de un vertido, se debe conseguir que la mezcla sea uniforme antes de alcanzar la superficie o cualquier zona en la cual se quiera minimizar el impacto de dicho vertido. En definitiva, si se quiere proteger la superficie, el vertido se tendrá que hacer a una distancia tal que no llegue a ella antes de estar completamente diluido, y si lo que se quiere proteger es el fondo se haría lo mismo.

En función de los objetivos de gestión del área habrá que decidir si es preferible dispersión (el vertido se diluye sin causar efectos alarmantes) o acumulación (el vertido afecta exclusivamente a la pequeña región donde se realiza (Devine et al., 1986)).

Hay que tener en cuenta al realizar esta elección varios factores. Las partículas que son liberadas al mar en el vertido tienden, por simple sedimentación, a acumularse en el fondo,

normalmente en su superficie, si bien esto depende de la naturaleza del fondo. Si es de tipo rocoso, efectivamente las partículas se acumularán en su superficie favoreciendo la resuspensión, mientras que si es arenoso las partículas penetran y se mezclan con la arena. Esto supone un impacto a largo plazo de los vertidos, pues no se hace notorio hasta pasado bastante tiempo (del orden de años) de realizado el vertido, al contrario de lo que ocurre en la columna de agua, donde los efectos son visibles en un plazo de días u horas.

Al principio esas partículas constituyen una pequeña fracción del sustrato, pero si el vertido es continuo y hay poca dispersión las partículas se mezclan en la capa superior de la superficie de los sedimentos como consecuencia de los movimientos del agua. La dispersión de esas partículas depende entonces de la resuspensión, que viene determinada por factores tales como las ondas producidas por tormentas y por mareas, como consecuencia del movimiento del agua a que dan lugar. Las partículas acumuladas en el fondo también pueden ser transportadas lejos por las corrientes locales.

La medida en que se acumulan las partículas residuales depende por tanto de las características de la zona, que determinan la rapidez con que se produce la dilución. Esto es:

(I) La "floculación" (formación de conglomerados de partículas) puede ser limitada por la dilución, y los "flóculos" romperse antes de llegar al fondo, con lo cual la acumulación se hace menos importante. Véase un modelo reciente en Jackson, 1990.

(II) Si la dispersión no es suficiente, el movimiento del agua puede acelerar la mezcla de las partículas en la superficie de los sedimentos.

(III) La dispersión también depende de la extensión de la resuspensión debida a la "velocidad de onda" en la columna de agua.

(IV) Las corrientes locales pueden transportar las partículas suspendidas, con una baja tasa de sedimentación, hacia otras zonas.

La dispersión local anual se puede representar como una combinación entre la resuspensión inducida por tormentas y la inducida por marea. Se considera que no existen barreras que limiten la efectividad de estos procesos localmente, aunque en la práctica muchos vertidos se realizan cerca de la costa, la cual limita su dispersión (la costa en este caso sería una barrera absorbente, concepto que definimos más adelante).

La capacidad de una zona para acumular partículas residuales es inversa a su dispersión local, aunque la acumulación depende también de otros factores como la cantidad de material vertido y la extensión del área en la cual se deposita. Esto da una medida estática de la acumulación de lodos.

Una estimación razonable de una zona donde realizar un vertido concreto puede hacerse conociendo la operación de vertido, las corrientes locales y la profundidad de la zona, lo cual se puede complementar con registros acerca del "descenso" de la pluma del vertido.

En cuanto a la acumulación neta, se pueden dar varias definiciones. Para ambientes que no sean completamente dispersivos, se considera como la fracción no dispersada de la cantidad total vertida por unidad de área, mientras que para ambientes dispersivos habrá un balance a largo plazo entre input y dispersión. Es decir, incluso cuando la dispersión es

completa en un periodo determinado, se suele presentar alguna contaminación en algún momento. Si aumenta la cantidad vertida aumentará también la contaminación transitoria, incluso en un ambiente completamente dispersivo.

Si todas las cantidades vienen dadas en base a un periodo anual, entonces la acumulación local A_L será:

$$\begin{aligned} A_L &= q/a (1-D_L) & D_L < 0.90 \\ A_L &= 0.1 q/a & D_L > 0.90 \end{aligned} \tag{4}$$

donde:

q es la cantidad de sólidos residuales anuales y se suele expresar en toneladas;

a es el área de sedimentación, que se suele expresar en km^2 .

Se puede definir, por otra parte, la región de influencia del vertido (Devine et al., 1985) como aquella que se extiende 40 km. alrededor del punto de vertido en todas las direcciones. Se considera, entonces, el área de acumulación regional como aquella encerrada por la línea de costa y esos segmentos radiales intersectantes.

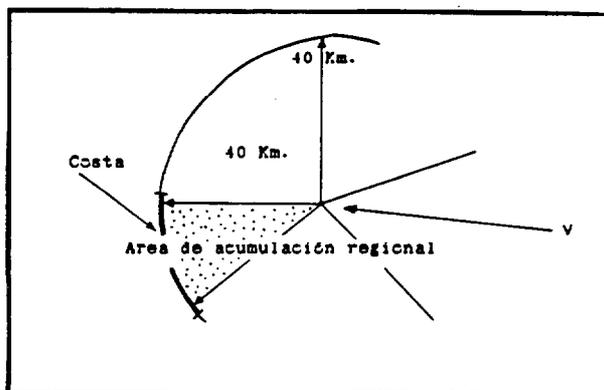


Fig. 5. - Región de influencia de un vertido.

La acumulación regional viene, entonces dada por:

$$\begin{aligned} A_R &= q/a_R (1-D_R) & D_R < 0.90 \\ A_R &= 0.1 q/a_R & D_R > 0.90 \end{aligned}$$

(5)

En este caso a_R es el factor de acumulación regional.

Se ha considerado en la descripción anterior la región de influencia de un vertido como aquella que está dentro de un radio de 40 km. alrededor del punto de vertido. Esto significa que el vertido sería activo en una superficie de 5.024 km^2 (Area= πR^2). Vamos a considerar ahora que dicha región está dividida en cuatro partes iguales, una de las cuales estaría limitada por la costa (como se ve en la figura anterior). El área de influencia del vertido que puede afectar a la costa sería, entonces, de $5.024/4 = 1.256 \text{ km}^2$. Esto equivale aproximadamente a la superficie de la isla de Gran Canaria que es de unos 1.532 km^2 . Estos números resultan un poco excesivos, sobre todo para darlos como una generalidad (hallada en función de los siete puntos estudiados), sin tener en cuenta la cantidad de vertido y su naturaleza, ni las corrientes y mareas que pueden influir en su dispersión (por lo menos en la referencia no aparecen estos datos). No es lo mismo, por ejemplo, que el vertido tienda a ir hacia la costa que hacia alta mar, ni tampoco es igual que se extienda paralelo o perpendicular a la costa. Hay que tener en cuenta, en defensa de la tesis expuesta acerca del área de influencia de un vertido, que lo que se quiere conocer es la acumulación de partículas de lodo residual en el fondo ya que, como dijimos antes, los efectos de un vertido en

la columna de agua se hacen notorios en un corto espacio de tiempo, contrariamente a lo que ocurre en el sedimento donde puede tardarse años. Todas las ideas se expresan, pues, en el sentido de las partículas que sedimentan y son susceptibles de acumularse en el fondo, de los mecanismos por los que son transportadas lejos y de la forma en que pueden ser resuspendidas una vez que han alcanzado el fondo. Por tanto, y para concluir, no se trata de que un vertido o sus posibles efectos sea visible en un radio de 40 km. o en una superficie total de 5.024 km², sino de que las partículas pueden estar presentes en una región de esas dimensiones y no notarse hasta que la acumulación alcance niveles importantes en algún punto dentro de dicha región.

En la Tabla III.8 se muestran las características de ocho lugares utilizados para la eliminación de lodos residuales, cuya localización se puede ver en la Fig.6. Podemos observar que los efectos más notorios se encuentran en Firth of Clyde, en la costa oeste de Escocia. El incremento de carbono orgánico y metales afectó a una superficie de 15 km², al eliminarse 1.400.000 tm de residuos al año, con un contenido de 70.000 tm de material sólido. Estos datos resultan un poco contradictorios con la definición que se ofrece sobre el área de influencia de un vertido.

Volviendo a lo que hablábamos antes acerca de la acumulación y dispersión de un vertido, se considera que si las ecuaciones (4) y (5) dan como resultado que $A_L < A_R$ entonces por definición $A_L = A_R$, ya que el factor local nunca puede ser menor que el regional.

La ecuación (4) implica que la dispersión no es instantánea; D_L indica la fracción de material vertido que es

dispersada lejos en un periodo de un año y varía desde 0 en zonas protegidas hasta 1 en zonas con fuertes mareas o con fuertes tormentas. Por ejemplo, en German Bight se vio que después de un largo periodo sin tormentas había poca dispersión, pero tomando un periodo de un año era completamente dispersivo. De todas formas en la Ec. (4) se considera que siempre hay alguna acumulación ya que la dispersión local nunca alcanza su valor máximo: Si $D_L=1$, $A_L=0$; pero la segunda ecuación es para $D_L > 0.90$, y se considera en este caso un valor constante de 0.1 ($1-D_L=0.1$; $D_L=0.90$), lo cual significa que siempre se acumula algo. Por eso es más significativo tomar un periodo largo, por ejemplo de un año, durante el cual se pueden alternar etapas en las cuales domina la dispersión con otras donde domina la acumulación, que tomar etapas cortas en las cuales es probable que domine uno de los dos procesos.

Si un vertido fuera expuesto a aguas abiertas en todas las direcciones, el material sería dispersado y eliminado de la región. Sin embargo, como ya apuntamos, muchas veces los vertidos se realizan cerca de la costa y, aunque la zona tenga características dispersantes, facilitadas por corrientes y mareas, siempre quedará una fracción de los residuos retenida en la zona costera. Un ejemplo de esto se encuentra en el estudio citado, en el cual se encontraron valores, en los ocho lugares estudiados, que variaban entre 0 y 0.75, lo cual significa que siempre queda retenida una parte de la cantidad vertida en un periodo de un año, en la zona costera, dentro de los 40 km. alrededor del punto de vertido que constituyen la región de influencia del vertido.

La acumulación local A_L (expresada por la ec. 4) utiliza la cantidad de residuos que se sedimentan por unidad de área para desarrollar una escala que mida la acumulación relativa (los resultados de algunas observaciones se dan en la Tabla III.9). No se tiene en cuenta en este factor la biodegradación que es más representativa para contaminantes persistentes, si bien al medirse la acumulación de contaminantes, implícitamente se está considerando la biodegradación. Este factor de acumulación constituye una guía de la cantidad total de lodo retenido. Los resultados obtenidos se dan en la Tabla III.9.

En general, se ha visto que se puede verter en un ambiente dispersivo, sin que se tenga por qué esperar un impacto significativo, unas 10.000 toneladas de residuos sólidos por año (unas 300.000 toneladas de residuos con un 3% de material sólido). De hecho, A_L sólo alcanza su máximo valor, es decir 1, para el Támesis donde se desechan 80.000 toneladas anuales. Si se desea, por tanto, que $A < 1$ esto probablemente se consigue con lo que se vierte habitualmente en cualquier lugar.

Los factores de dispersión y acumulación discutidos anteriormente sugieren que la contaminación de un fondo (o lecho) marino debida a lodos residuales vertidos al oceano puede predecirse a partir de algunas características básicas del lugar (naturaleza de los sedimentos, movimientos del agua en el fondo del mar, presencia de canales o depresiones donde puedan acumularse los residuos, etc...). Esto debería tenerse en cuenta previamente a la hora de elegir lugares idóneos o preferentes para eliminar desechos de tierra.

Estos lugares podrían ser entonces objeto de investigaciones más rigurosas, que tuvieran en cuenta otros factores como calidad del agua y recursos vivos. Tal investigación redu-

ciría los costes a la hora de hacer valoraciones sobre el lugar de vertido idóneo y podría ser útil para desarrollar estrategias de gestión, que normalmente llevan consigo técnicas de "deposición" de vertidos, estimaciones de la cantidad anual de lodos que se puede verter y programas de control.

Lo ideal sería que haciendo uso de esta investigación se evitara gran parte de la incertidumbre en la predicción de impactos de los vertidos. El conocimiento de las características del punto de vertido mejoraría el proceso de decisión y aumentaría la probabilidad de éxito en las estrategias de gestión de residuos.

Algunos de los modelos expuestos en este apartado pueden servir de punto de partida a la hora de buscar un área idónea para realizar un vertido, al menos como una parte de ella. Dicha zona sería buscada en un sentido negativo, eliminando zonas no adecuadas y buscando la distancia a la costa y la profundidad óptimas, para lograr una gestión integral del ambiente marino.

Characteristics of eight sewage sludge dumpsites (from Norton & Champ, 1985)

Site	Lyme Bay	Plymouth	German Bight	Bristol Channel
Location and depth	Off S coast of England; 40 M	Off S coast of England; 50 M	Off NW coast of Germany; 20 M	Bristol Bay, W England; 35 M
Annual Loading	Total (mt) 62,000 Solids (mt) 2,100	76,000 4,100	290,000 14,500	330,000 8,800
Environmental Characteristics	Moderate tides, sheltered from storms; fine sand bottom	Moderate tides, some exposure to storms; sand and gravel bottom	Moderate tides, occasional very strong storms; fine sand and silts on bottom	Strong tides, occasional weak to moderate storms; sand and gravel bottom with some exposed bed rock
Contaminants	Some elevation in carbon, lead, mercury and zinc (30-60%)	No observed increase	Contaminants accumulate between storms, are dispersed at least annually	Some elevation of carbon and zinc (40%)
Site	Firth of Clyde	Liverpool Bay	New York Bight	Thames Estuary
Location and depth	W coast of Scotland; 100 M	Western England; 25 M	Off New York/New Jersey coast; 20-25 M	SE England; 20 M
Annual Loading	Total (mt) 1,400,000 Solids (mt) 70,000	1,665,000 65,200	4,400,000 171,600	4,620,000 124,700
Environmental Characteristics	Very weak tides, little storm disturbance	Moderate to strong tides, occasional moderate storms	Weak tides, occasional very strong storms—mixed	Very strong tides occasional weak to moderate storms; complex sand bottom with mud, shells, and sand banks
Contamination	Bottom modified to black fibrous, smelly substance, greatly increased organic carbon and metals over 15 km ²	Elevated carbon and metals (2X-6X background) in 5-10 km ² area	Carbon and metals increased in 6 km ² area; widespread bacterial contaminants	Some increase in carbon and metals in deep areas.

Tabla III. 8. - Características de ocho lugares utilizados para la eliminación de lodos residuales.

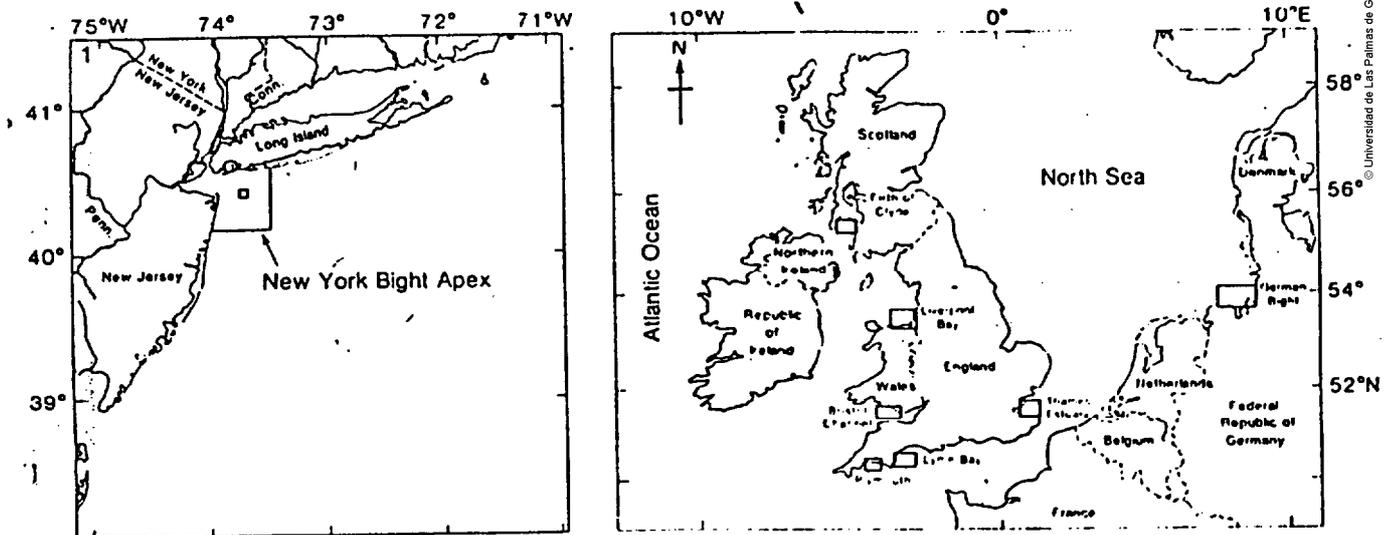


Fig. 6. - Localización de los ocho lugares estudiados.

FACTOR DE ACUMULACION	RESULTADOS
$A_L < 1$	Poca acumulación. Efectos no significativos.
$1 < A_L < 10$	Acumulación significativa.
$A_L > 10$	Acumulación sustancial. Efectos importantes.

Tabla III.9.- Valores de la acumulación local y posibles efectos (Devine et al., 1985).

IV.
FORMULACION DE UN MODELO BIDIMENSIONAL.

tido fijo por uno móvil, por ejemplo. Se trata, entonces de plantear el problema desde un punto de vista más directo, siguiendo la trayectoria individual de las partículas del vertido y calculando, en promedio, sus posiciones y el tiempo invertido en alcanzarlas. El hecho de alejar lo suficiente el vertido tiene dos objetivos: a) Dar más tiempo a la actuación de los mecanismos naturales en la degradación, sedimentación, etc. del vertido, y como consecuencia de ello, b) una mayor protección de las áreas interesantes en lo referente a la presencia de contaminantes.

Esta idea permite hallar la distribución de probabilidad de encontrar partículas no deseadas en zonas predeterminadas, o del tiempo que tardarían en llegar a ellas. Esta puede ser la base para establecer las condiciones del vertido, de modo que se consigan las condiciones deseadas en las áreas de interés.

En esencia, la base del método consiste en suponer que una vez depositadas las partículas de un vertido en un punto, quedan sometidas a la influencia de diferentes procesos, como corrientes, variaciones en la flotabilidad y difusión de diferentes tipos. La dificultad de calcular con exactitud las contribuciones de los distintos factores en el desarrollo individual de las partículas, nos ha llevado a buscar otras formas de construcción de modelos, basadas en considerar el movimiento de las partículas como un proceso aleatorio.

Así por ejemplo en algunos trabajos de este Departamento se ha tenido en cuenta la distribución del tamaño de una mancha contaminante y se ha calculado la longitud de la misma. Comparando con las características geométricas de la zona se obtienen resultados útiles para este objeto (Rodríguez, 1988). También se ha planteado el problema de la eliminación de partículas basado en el tiempo de permanencia en las capas superiores

del océano, donde puede interferir con las actividades desarrolladas por el hombre (Fernández, 1988; Rodríguez et al., 1990).

Lo que planteamos en este trabajo es una generalización de las ideas de los dos autores anteriores, esto es, el estudio de la evolución de partículas individuales en dos dimensiones.

IV.2. Planteamiento del modelo.

IV.2.1. Formulación clásica.

La formulación matemática clásica para este problema en dos dimensiones es la siguiente:

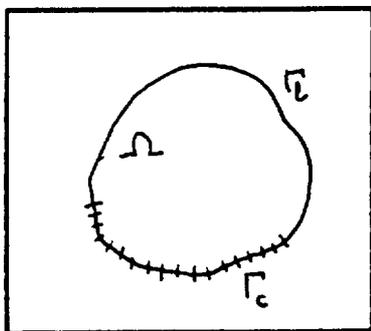


Fig. 1. - Esquema general de la situación estudiada.

Se considera el recinto plano Ω cuya frontera Γ se descompone en Γ_c = línea de costa y Γ_L = frontera libre. En este recinto se plantea la siguiente ecuación de reacción-advect-

ción-difusión para la magnitud $C = C((x,y),t)$, es decir, para la concentración del contaminante en (x,y) en el instante t :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = f(c,t) + v \cdot \nabla c + \text{div} (K \text{ grad } c)$$

donde los términos se interpretan de la siguiente manera:

$f(c,t)$ es un término de reacción y fuentes distribuidas de contaminación. Normalmente este término deberá escribirse de la siguiente forma:

$$f(c,t) = F(c) + G((x,y),t)$$

donde F es la reacción (por ej. el "decay" microbiológico o químico) y $G((x,y),t)$ representa la aportación a la zona Ω de cargas contaminantes.

$v \cdot \nabla c$ es el término de advección correspondiente al transporte o acciones a macroescala en el medio marino, dado por el campo v de velocidad de la corriente.

$\text{div} (K \text{ grad } c)$ es el término de difusión, donde K es el tensor de difusión. En toda generalidad $K = K_{ij}[(x,y),t,c]$, aunque en la práctica $[K_{ij}] = kI$, siendo k un coeficiente numérico estimado empíricamente, e I la matriz unidad 2×2 . En este supuesto el término $\text{div} (K \text{ grad } c)$ pasa a ser simplemente $k \nabla^2 c$.

Caso de que f no sea lineal en c el problema práctico pasa de modo casi inmediato a su análisis numérico, aunque

existe un campo muy activo de investigación teórica en ecuaciones no lineales (Ver, por ejemplo, Leung, 1988).

Por lo demás se deben imponer condiciones de contorno e iniciales a la ecuación principal. La condición inicial típica es dar una estimación de $C = C_0(x,y)$ para un tiempo t_0 , y como condiciones de contorno pueden elegirse diferentes tipos, normalmente distintos en cada parte Γ_i de la frontera $\Gamma = \partial\Omega$. Típicamente, si $(x,y) \in \Gamma$, la condición de Dirichlet

$$c [(x,y),t] = 0$$

indica que en la frontera no hay contaminación, y la condición de Neumann en una parte de la frontera, por ej. Γ_c :

$$\frac{\partial C}{\partial n} [(x,y),t] = 0 \quad \text{si} \quad (x,y) \in \Gamma_c$$

indicaría que no hay flujo contaminante hacia el exterior. Si Ω es relativamente "grande" puede suponerse que el sistema está totalmente limitado por Ω (Ver por ejemplo Aracil, 1978) y que el fenómeno

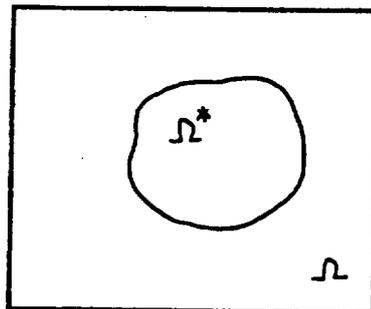


Fig. 2.

objeto de estudio radica en $\Omega^* \subset \Omega$. En tal caso puede resultar

razonable trabajar en Ω con las condiciones de contorno más sencillas, las de Dirichlet.

Esta vía de estudio está perfectamente asumida en los trabajos de contaminación marina y es objeto de investigación constante para mejorar los resultados numéricos en función de diferentes formulaciones para los distintos aspectos que intervienen en la ecuación básica. En especial es importante destacar que la extensión a 3-D es una de las más activas áreas de trabajo en la actualidad (Ver Zienkiewicz y Schrefler, 1988).

IV.2.2. Una nueva visión del problema.

En lugar de tomar la forma anterior de atacar el problema, en este trabajo se planteará la siguiente cuestión: ¿Es posible hallar una estimación del tiempo que tardará el contaminante en desaparecer de la región Ω , sometido a la acción de los procesos generales marinos? Es claro que esta estimación es de indudable interés para determinar el sentido idóneo en función de los siguientes factores:

- a) Dinámica dominante.
- b) Distancia adecuada.
- c) Predicción meteorológica a diferentes plazos.
- d) Características de degradabilidad del contaminante.
- e) Uso de la zona litoral.

En primer lugar vamos a formular las hipótesis del modelo, basándonos en consideraciones oceanográficas. Supondremos que el mar se modeliza como un continuo bidimensional $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ simplemente conexo cuya frontera es simplemente como en la Fig.

1 (Puede plantearse también el problema para un recinto múltiplemente conexo, por ej. en presencia de islas o islotes, como en la laguna de Venecia. Para esta formulación puede consultarse Grusa, 1988). Por tanto, supondremos homogeneidad en vertical en la columna de agua. Esto puede conseguirse estudiando, en lugar de la variable tridimensional $C[(x,y,z),t]$, la variable integrada:

$$C^*[(x,y),t] = \frac{1}{z^*} \int_0^{z(x,y)} C[(x,y,\sigma),t] d\sigma$$

donde $z(x,y)$ representa la topografía del fondo y z^* la profundidad media, que puede hallarse así:

$$z^* = \frac{\int_{\Omega} z(x,y) dx dy}{\int_{\Omega} dx dy}$$

Una vez en el caso bidimensional, cuando una partícula es depositada en $(x,y) \in \Omega$, se encuentra sometida a las siguientes acciones fundamentales:

a.- Traslado o advección debido a las corrientes. Ello equivale a conocer el campo de velocidades $v[(x,y),t]$ en el dominio espacio-temporal $\Omega \times \mathbb{R}^+$, lo cual suele obtenerse por datos experimentales tomados mediante correntímetros en la zona que se desea estudiar. El campo v engloba los diferentes mecanismos que producen corrientes marinas:

Corrientes inducidas por el viento.

Corrientes de tipo geostrófico.

Corrientes de marea.

Corrientes locales inducidas por variaciones topográficas, etc.

La dependencia temporal de v resulta un inconveniente desde el punto de vista matemático. En base a datos experimentales (Hernández Brito, 1990, comunicación personal), se conoce que los tiempos de permanencia de partículas no sometidas a complejación química son del orden de horas. Por tanto, para el modelo supondremos que no hay dependencia temporal y que la dependencia espacial se mantiene establemente durante el periodo de estudio. La introducción de efectos de cizalla horizontal hace razonable suponer que el módulo de $v(x,y)$ varía siguiendo un perfil parabólico a partir de la línea de costa.

b.- Efectos a menor escala debidos a la suma de la actividad del oleaje y fuerzas moleculares. Esto se modeliza como antes, con el coeficiente K de difusión, cuyo cálculo se realiza por métodos empíricos. Normalmente es variable en función de la posición y del tiempo, en particular en zonas costeras existe un gradiente en función de la distancia a la línea de costa. En el modelo, para simplificar, se tomará constante en la zona. En la Fig.3 se ilustra lo dicho.

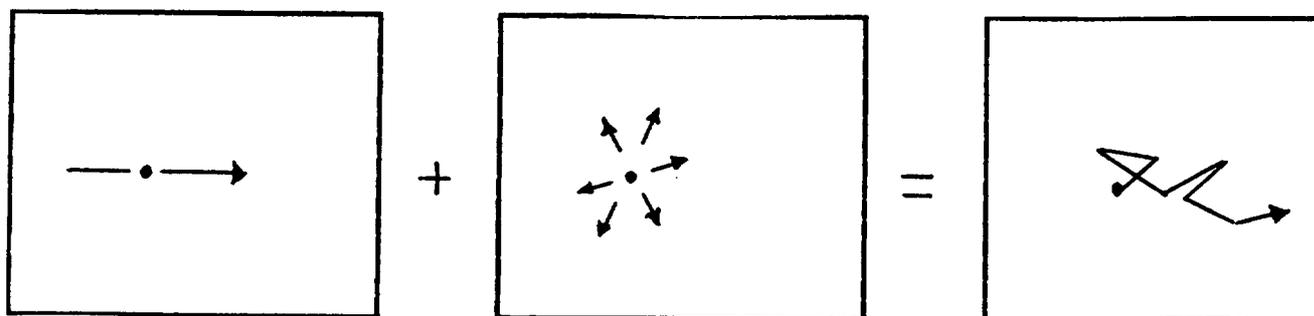


Fig. 3. - Esquema general de los procesos que actúan sobre una partícula liberada en el mar: a) Advección; b) Difusión; c) Trayectoria real.

Por tanto, el movimiento de la partícula en Ω sugiere la consideración como un proceso aleatorio bidimensional, en el cual se observa una deriva, dada por el campo de velocidades v , y una difusión que modelizamos a través del coeficiente de difusión K . A partir de ahora consideraremos que ese movimiento es un proceso aleatorio, al cual vamos a atribuir ciertas propiedades:

a) Las observaciones oceanográficas indican que el océano se puede suponer en estado de equilibrio estadístico (Rodríguez, 1988) y, por tanto, que los estadísticos que describen la dinámica marina son invariantes por traslación en el tiempo. Así pues, el proceso puede suponerse estacionario.

b) Resulta razonable imponer, basándose también en consideraciones empíricas, un carácter ergódico al proceso, esto es, a largo plazo las propiedades estadísticas sólo dependen de la ubicación en la cual se realizan las observaciones:

$$\lim \text{prob} (x, t / x', 0) = \text{prob}_S(x)$$

Esta característica, unida a la de carácter estacionario, resulta en que, para nuestro desarrollo, el proceso ilustrado en la Fig.3 es un proceso homogéneo.

A partir de las consideraciones anteriores podemos concluir que para la construcción de nuestro modelo nos vamos a concentrar en seguir la evolución de partículas inertes aisladas, en dos dimensiones dentro de una región Ω , con las partículas sometidas al efecto de los dos procesos que contribuyen sustancialmente a la mezcla oceánica: advección y difu-

sión. En esencia este problema ha sido tratado en algunos trabajos de este Departamento (Padilla, 1989).

Para modelizar este proceso hacemos uso de la función de densidad probabilística:

$$p[(x',y'),t / (x,y),0]$$

que es la probabilidad de encontrar una partícula en la posición (x',y') en el tiempo t , sabiendo que en $t=0$ la posición era (x,y) . Esto tiene un especial interés cuando $(x,y) \in \partial\Omega$ ó $(x,y) \in \Gamma_c$, siendo Γ_c una zona destacada de $\partial\Omega$, en este caso la línea de costa.

Después de un tiempo t , la probabilidad de que la partícula, inicialmente en (x,y) , permanezca aún en Ω viene dada por:

$$P[(x,y),t] = \iint_{\Omega} p [(x',y'),t/(x,y),0] dx'dy' \quad (1)$$

El problema que nos planteamos, y que vamos a resolver a continuación, es el siguiente: Hallar el tiempo medio de salida de la partícula del dominio Ω , a través de $\partial\Omega$.

Este problema está relacionado con los residuos degradables, ya que si el tiempo medio de salida es superior al de degradación por el ambiente marino, entonces las decisiones que haya que tomar en relación con la gestión medioambiental han de tener en cuenta esta posibilidad.

La fórmula (1) puede interpretarse también como que la

probabilidad de que el tiempo de salida de Ω de la partícula depositada en (x,y) es mayor que t . Esto es:

$$\text{Prob}(t_s \geq t) = \mathbb{P}((x,y),t) \quad (2)$$

Como ya dijimos, se supone homogeneidad en el proceso estocástico, y entonces sabemos que la probabilidad

$$p[(x',y'),t/(x,y),0]$$

satisface la ecuación de Fokker-Planck del pasado en dos dimensiones (ver Gardiner, 1983; Cox-Miller, 1965):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = A_1(x,y) \frac{\partial p}{\partial x} + A_2(x,y) \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(K_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

donde A_1 y A_2 (m/día) son las componentes del campo de velocidades y K_x , K_y (m^2 /día) los coeficientes de difusión turbulenta horizontales.

Integrando la ecuación de Fokker-Planck respecto de $dx'dy'$ en Ω encontramos que $\mathbb{P}((x,y),t)$ también verifica la EFP:

$$\frac{\partial \mathbb{P}}{\partial t} = A_1(x,y) \frac{\partial \mathbb{P}}{\partial x} + A_2(x,y) \frac{\partial \mathbb{P}}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(K_x \frac{\partial^2 \mathbb{P}}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \mathbb{P}}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Imponemos ahora las condiciones iniciales y de contorno siguientes:

a) Inicial: $p[(x',y'),0/(x,y),0] = \delta(x'-x, y'-y)$, esto

es:

$$P((x,y),0) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x,y) \in \Omega \\ 0 & \text{en el resto de casos} \end{cases}$$

La condición (a) indica simplemente la imposibilidad de que una partícula se halle simultáneamente en dos posiciones diferentes para $t=0$.

b) Contorno: Consideramos que la frontera $\partial\Omega$ de Ω está dividida en trozos de barrera reflectante Γ_L y trozos de barrera absorbente Γ_c .

La condición de barrera absorbente se modeliza por:

$$P[(x,y),t] = 0 \quad \text{si } (x,y) \in \Gamma_c$$

Esta condición indica que, una vez la partícula alcanza la frontera, es eliminada del sistema, por lo que no es posible encontrar partículas en los puntos de $\Gamma_c \in \partial\Omega$. De ahí esta condición homogénea, tipo Dirichlet.

Y la barrera reflectante sería:

$$n_1 K_x \frac{\partial P}{\partial x} + n_2 K_y \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad \text{si } (x,y) \in \Gamma_L$$

donde $n = (n_1, n_2)$ es el vector normal a $\partial\Omega$.

La barrera reflectante indica que toda partícula que alcanza un punto $(x,y) \in \Gamma_L$ es rechazada hacia el interior de Ω . Por tanto, no hay flujo a través de Γ_L y de ahí se tiene esta condición tipo Neumann.

Para calcular el tiempo medio de salida T_s procederemos de la siguiente forma: como $\mathbb{P}((x,y),t) = \text{Prob}(T_s \geq t)$ tenemos que $\text{Prob}(T_s < t) = 1 - \mathbb{P}((x,y),t)$, luego la función de densidad para esta función es de la forma:

$$-\frac{\partial}{\partial t} \mathbb{P}[(x,y),t] \tag{5}$$

Por tanto, el tiempo medio de salida será:

$$T_s(x,y) = \langle T_s \rangle = - \int_0^{\infty} \frac{\partial \mathbb{P}}{\partial t} dt = \int_0^{\infty} [\mathbb{P}((x,y),t)] dt \tag{6}$$

A partir de aquí podemos establecer una ecuación en derivadas parciales para la función $T_s(x,y)$. Integrando la ecuación (4) sobre todo \mathbb{R}^+ tendremos:

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial \mathbb{P}}{\partial t} dt = \int_0^{\infty} \left(A_1 \frac{\partial \mathbb{P}}{\partial x} + A_2 \frac{\partial \mathbb{P}}{\partial y} \right) dt + \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left(K_x \frac{\partial^2 \mathbb{P}}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \mathbb{P}}{\partial y^2} \right) dt \tag{7}$$

Vamos a estudiar ahora cada uno de los términos de esa ecuación. Tenemos:

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial t} \mathbb{P}((x,y),t) dt = \mathbb{P}((x,y),\infty) - \mathbb{P}((x,y),0) = -1 \quad (8.1)$$

puesto que al cabo de un tiempo infinito la probabilidad de no haber salido es nula.

$$A_1 \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} \mathbb{P} dt + A_2 \frac{\partial}{\partial y} \int_0^{\infty} \mathbb{P} dt = A_1 \frac{\partial T_s}{\partial x} + A_2 \frac{\partial T_s}{\partial y} \quad (8.2)$$

donde se ha utilizado la relación (6).

$$K_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^{\infty} \mathbb{P} dt + K_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^{\infty} \mathbb{P} dt = K_x \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \quad (8.3)$$

utilizando también la relación dada en (6).

Sustituyendo en (7) quedará:

$$A_1(x,y) \frac{\partial T_s}{\partial x} + A_2(x,y) \frac{\partial T_s}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(K_x \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) = -1 \quad (9)$$

Ahora, las condiciones de contorno impuestas a la EFP (4) originan condiciones de contorno para esta ecuación como sigue:

$$n_1 K_x \frac{\partial T_s}{\partial x} + n_2 K_y \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0 \quad \text{si } (x,y) \in \Gamma_L \quad (11)$$

$$T_s(x,y) = 0 \quad \text{si } (x,y) \in \Gamma_c$$

El interés del modelo que proponemos hace que nos restrinjamos al caso con condiciones de Dirichlet; este extremo se justifica físicamente en el capítulo siguiente. El operador del primer miembro tiene por parte principal

$$K \nabla^2 T = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

por lo que, al ser K constante positiva, es fuertemente elíptico. En el dominio $\Omega = \Omega \cup \Gamma$ tenemos, representando por $L(T)$ el primer miembro de la ecuación, $L(T) = f$, donde $f \in C(\Omega)$. En el marco general de la teoría elíptica (ver Voigt, 1975), el problema de Dirichlet para este operador de orden 2 es

$$\begin{aligned} L(T) &= f & \text{en } \Omega & \quad (f=-1, \text{ aquí}) \\ T &= g & \text{en } \Gamma & \quad (g=0, \text{ aquí}) \end{aligned}$$

Para este problema existe solución débil única en la teoría L^2 en el espacio de Sobolev $W_2^1(\Omega) = \{(\text{clases de}) \text{ funciones de } L^2(\Omega) \text{ cuya primera derivada generalizada está en } L^2 \text{ y}$

que "se anulan" en Γ }. En el caso general donde se incluyen diferentes tipos de condiciones en distintas partes de la frontera, la solución se hallará en otros espacios que incluyen las "trazas" en Γ . No entraremos aquí en ese campo (ver Lions, 1961, Pacheco, 1983).

La aproximación numérica a las soluciones se obtiene por un método de elementos finitos o bien, de modo más clásico, por un esquema en diferencias finitas. Dado que lo que interesa aquí son resultados orientativos, una representación de los mismos a base de curvas de nivel será suficiente.

Este problema es el análogo bidimensional del caso tratado en la tesis de I. Fernández (Fernández, 1988) para el tiempo de caída vertical. En este caso la ecuación final para el tiempo de salida era un problema de contorno para una ecuación diferencial ordinaria. Aquí, por el contrario, tenemos una ecuación elíptica en derivadas parciales, y podemos resumir lo expuesto en el siguiente teorema.

TEOREMA:

"En la hipótesis de que la dinámica marina se representa mediante un proceso estocástico homogéneo en la región Ω con frontera $\Gamma = \partial\Omega$, el tiempo medio de salida de Ω de una partícula depositada en $(x,y) \in \Omega$ viene dado por la solución del problema elíptico de contorno

$$v_1 \frac{\partial T_s}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T_s}{\partial y} + \frac{1}{2} K \nabla^2 T = -1$$

$$T_s(x,y) = 0 \quad \text{si } (x,y) \in \Gamma_L$$

$$\frac{\partial T_s(x,y)}{\partial n} = 0 \quad \text{si } (x,y) \in \Gamma_c$$

En el capítulo V se estudia numéricamente este problema en el caso de condiciones de Dirichlet. Allí se justifica esta elección.

IV.3. Cuestiones complementarias al modelo.

El apartado anterior permite calcular el tiempo medio de salida de Ω en función de los parámetros de advección y difusión. Obviamente este cálculo, que da un valor orientativo, no quedará completo si no se especifican otros estadísticos de la variable "tiempo de salida". Por un procedimiento análogo al estudiado al hallar la media $T_s = \langle t \rangle$ pueden hallarse los momentos de cualquier orden:

$$T_s(x,y) = \langle t^n \rangle = \int_0^{\infty} t^{n-1} P((x,y), t) dt$$

Estas nuevas magnitudes satisfacen el esquema mixto en diferencias/derivadas parciales:

$$-nT_{n-1} = v_1 \frac{\partial T_n}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T_n}{\partial y} + \frac{1}{2} K \nabla^2 T_n$$

con la condición de contorno de Dirichlet,

$$T_n(x,y)=0 \quad \text{si } (x,y) \in \Gamma$$

Por ejemplo, para $n=1$ obtenemos el resultado dado por el teorema anterior y para $n=2$, conocido $T_n = T_1$, se puede hallar el T_2 para calcular la desviación típica. No se ha entrado en este cálculo pues conceptualmente se trató sólo de una estimación orientativa del tiempo de salida, por lo que consideramos el problema físico resuelto con el cálculo de los valores medios.

Otro problema que puede resultar más interesante, y en el que no se ha trabajado numéricamente en esta memoria, es el de hallar la probabilidad de salida de la partícula del recinto Ω precisamente a través de Γ_c , la línea de costa, que representa la zona de barrera absorbente. Este asunto se halla tratado teóricamente en Padilla et al., 1989, y es como sigue:

$$|d\alpha(\omega)| P_\alpha((x,y),t) = - \int_0^t J(\alpha, t' | (x,y), 0) dt' d\alpha(\omega)$$

donde J es una corriente de probabilidad adecuada y la expre-

sión \mathbb{P}_a satisface la ecuación de Fokker-Planck del pasado,

$$v_1 \frac{\partial \mathbb{P}_a}{\partial x} + v_2 \frac{\partial \mathbb{P}_a}{\partial y} + \frac{1}{2} K \nabla^2 \mathbb{P}_a = \frac{\partial \mathbb{P}_a}{\partial t} \quad (1)$$

con las condiciones suplementarias siguientes:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}_a((x,y),0) &= 0, \text{ si } (x,y) \in \Omega, (x,y) \neq a \\ \mathbb{P}_a((x,y),t) &= 0, \text{ si } (x,y) \in \Gamma, (x,y) \neq a \end{aligned}$$

Dado que la salida de Ω a través de $d\omega$ se considera cierta, se cumplirá también que para todo t :

$$\mathbb{P}_a(a,t) d\omega = 1$$

o, resumiendo todo en una fórmula única:

$$\mathbb{P}_a((x,y),t) = \delta_{\Gamma}(a-(x,y)) \quad \text{si } (x,y) \in \Gamma \quad (2)$$

Así pues, la probabilidad de que la salida de Ω tenga lugar precisamente a través de $d\omega$ vendrá dada por:

$$\pi(a,(x,y)) |d\omega| = \mathbb{P}_a((x,y),\omega) |d\omega| \quad (3)$$

siendo (x,y) el punto donde se depositó la partícula, y el tiempo medio para que tal cosa ocurra vendrá dado por:

$$T_a(a,(x,y)) = - \int_0^{\infty} \frac{\mathbb{P}_a((x,y),t)}{\pi(a,(x,y))} dt \quad (4)$$

Razonando como antes, este T_s satisface el siguiente problema en derivadas parciales:

$$v_1 \frac{\partial}{\partial x} (\pi T_s) + v_2 \frac{\partial}{\partial y} (\pi T_s) + \frac{1}{2} K \nabla^2 (\pi T_s) = -\pi \quad (5)$$

en la frontera: $\pi T_s = 0$

donde $\pi = \pi(a, (x, y))$ y $T_s = T_s(a, (x, y))$.

Unicamente queda determinar el valor de π . Usando la ecuación de Fokker-Planck (1) y haciendo $t \rightarrow \infty$ en ella, junto con la condición (2) quedará el problema homogéneo siguiente:

$$v_1 \frac{\partial \pi}{\partial x} + v_2 \frac{\partial \pi}{\partial y} + \frac{1}{2} K \nabla^2 \pi = 0 \quad (6)$$

con la condición de contorno sobre Γ :

$$\pi(a, (x, y)) = \delta_{\Gamma} (a, (x, y)) \quad (7)$$

En este trabajo no se ha tratado este problema ni desde el punto de vista teórico (la solución de (6),(7) se hallará en un espacio donde tenga sentido la condición (7)) ni desde el práctico del cálculo numérico, dejándolo abierto para posteriores investigaciones.

Desde un punto de vista heurístico resultaría interesante atacar el problema inverso: Dados Γ_c y los parámetros

(v_1, v_2) y K , hallar la "región de influencia" de Γ_c , esto es, el conjunto de puntos $\Omega_c \subset \Omega$ para los que la probabilidad de salida por Γ_c sea superior a un valor prefijado P_{\max} . Esto permitiría considerar Ω_c como un área prohibida para los vertidos, como se ve en la figura 4. No se ha intentado explorar esta idea, que queda abierta para el futuro, aunque no parece sencilla de formular.

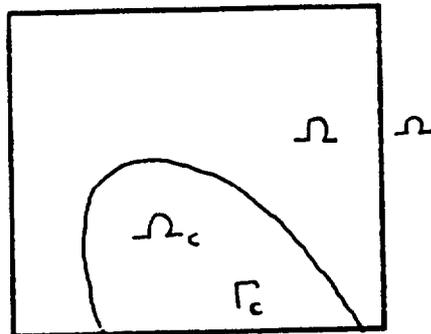


Fig. 4. - "Región de influencia" de Γ_c

V.
EXPERIMENTOS NUMERICOS.

V.1. Resultados de los experimentos.

EL modelo propuesto tiene un valor sobre todo orientativo, y su interés radica en que puede proveer estimaciones que serán utilizadas por el gestor ambiental en la toma de decisiones. Con este objeto se han realizado una serie de simulaciones, consistentes en resolver el problema suponiendo barrera absorbente, esto es, condiciones de Dirichlet, $T(x,y)=0$ si $(x,y) \in \Gamma$.

Si se tomase el caso general en el que $\Gamma = \Gamma_C \cup \Gamma_L$ (ver Fig. 1 del Capítulo IV), habría que imponer condiciones diferentes en Γ_C (la costa) y Γ_L (frontera libre). Estas condiciones no son fáciles de especificar, pues si bien en Γ_C una condición de Dirichlet modeliza el hecho de que al llegar a $(x,y) \in \Gamma_C$ la partícula desaparece del sistema, quedando fija en la costa por procesos de tipo físico, químico, etc., en Γ_L la condición de Dirichlet es en exceso fuerte, pues obviamente la dinámica combinada advección-difusión puede introducir de nuevo la partícula en el interior de Ω . Por otro lado, la introducción de condiciones tipo Neumann tampoco es totalmente realista: En Γ_C indicarían que las partículas contaminantes no pueden salir de Ω , lo cual está en contradicción con las observaciones más elementales, y en Γ_L nos dirían que el contaminante está siempre confinado en Ω , lo que no es real en absoluto. Tal vez, y esto no se ha investigado aquí, las condiciones de contorno adecuadas se representarían mejor mediante integrales que indiquen la distribución espacial esperada sobre Γ de los contaminantes en función de las condiciones ambientales. Este es un problema que puede llevarse a uno de frontera

móvil y no parece fácil de atacar.

Con objeto de justificar la elección de las condiciones de Dirichlet podemos recurrir al concepto de "límites de un sistema". Simplemente consiste en suponer que Ω es lo bastante grande como para contener una zona de interés y una zona de seguridad.

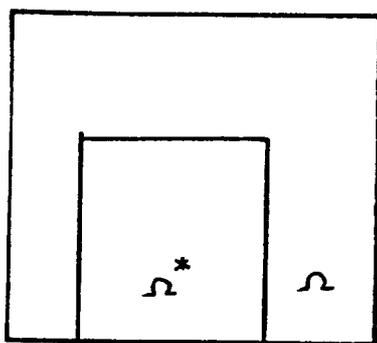


Fig. 1. -

En este caso podemos pensar que restringiendo la interpretación del trabajo realizado a la zona Ω^* de interés podremos considerar representativos los resultados. Normalmente la zona Ω^* deberá determinarse empíricamente por medidas in situ de los diferentes parámetros biogeoquímicos y físicos.

Las observaciones y los datos habituales de la literatura oceanográfica ofrecen para el vector campo y para el coefi-

ciente de difusión los siguientes rangos, tras el cambio de unidades (Pond y Pickard, 1978)

Velocidades de corrientes: de 0 a 7 km/día en módulo.

Coefficientes de difusión: de 0 a 6 km²/día.

Las simulaciones realizadas se han llevado a cabo combinando algunos valores que han parecido significativos. Así tenemos, seleccionando para $K=3$ ó 5 km²/día, y considerando como Ω el cuadrado $[0.5] \times [0.5]$ de 5 km. de lado, los siguientes casos:

- TIPO I.

Campo paralelo a la línea de costa, es decir, $(v_1, v_2) = (cte, 0)$, con valores para la constante de 1, 3, 5 km/día.

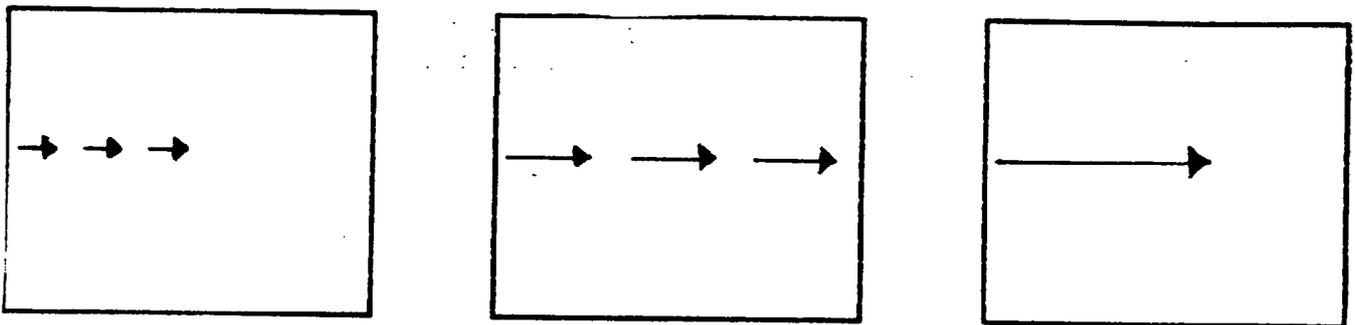
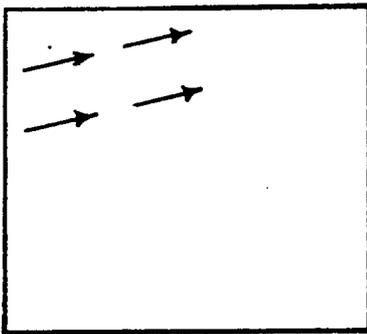


Fig. 2. -

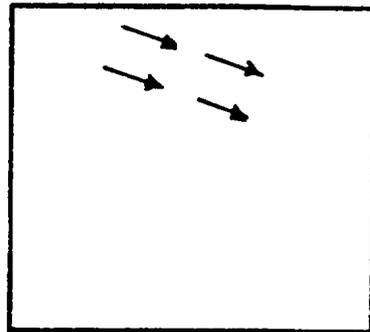
- TIPO II.

Campo oblicuo a la costa, constante en módulo.

- a) $(v_1, v_2) = (2, 1)$, alejándose.
- b) $(v_1, v_2) = (2, -1)$, acercándose.



a)



b)

Fig. 3. -

- TIPO III.

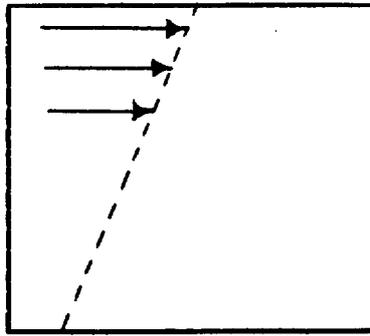
a) Perfil lineal en corrientes paralelas a la costa.

$$(v_1, v_2) = (0.5 + 0.5y, 0)$$

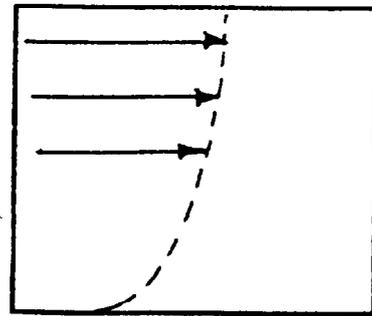
b) Perfil parabólico en corrientes paralelas a la costa.

$$(v_1, v_2) = (0.25 + 0.75 \sqrt{y}, 0)$$

Este tipo permite introducir efectos de cizalla horizontal.



a)



b)

Fig. 4. -

- TIPO IV.

Perfil lineal en la componente paralela a la costa, corriente oblicua.

a) $(v_1, v_2) = (0.5+0.5y, -0.5y)$, alejándose.

b) $(v_1, v_2) = (0.5+0.5y, -0.5y)$, acercándose.

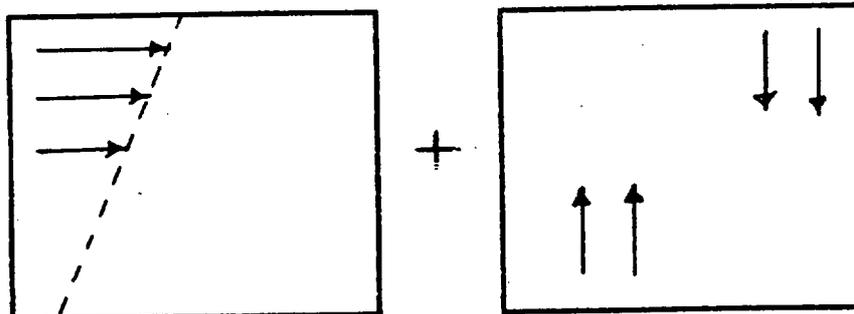


Fig. 5. -

- TIPO V.

Perfil parabólico en la componente paralela a la costa, corriente oblicua hacia la costa.

$$(v_1, v_2) = (0.25 + 0.75 \sqrt{y}, -0.5y)$$

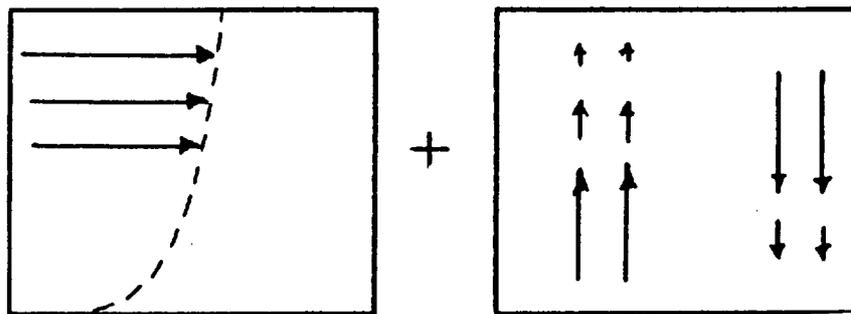


Fig. 6. -

Se plantea así un estudio de 20 casos, de los que se exponen más adelante los 10 más relevantes.

Los resultados se presentan mediante curvas de nivel de las superficies solución del problema elíptico en que consiste el modelo planteado en el capítulo anterior.

V.2. Sobre los métodos numéricos.

La resolución de un problema fuertemente elíptico es una cuestión habitual en muchas ramas de la técnica. En el caso que nos ocupa la ecuación es lineal y la frontera Γ del recinto Ω es lo suficientemente buena para no plantear problemas. Además la condición homogénea de contorno es la más sencilla posible.

Desde el punto de vista numérico, la resolución de este tipo de problemas presenta la dificultad de conjugar las magnitudes relativas de los términos advectivos, $|(v_1, v_2)|$, y de difusión, $|K|$. Los valores seleccionados para los experimentos, y que son acordes con datos reales, no presentan dificultades.

Para resolver el problema se puede elegir entre los esquemas en diferencias finitas o los métodos a base de elementos finitos. En este caso, un análisis puramente físico del problema hace sospechar, antes de proceder a resolver numéricamente, que la función solución $T(x,y)$ presentará una gráfica acampanada con un único máximo situado más bien en la mitad izquierda del recinto Ω . Ello indica que existen zonas en las que la gráfica es más pendiente y por lo tanto el cálculo de los valores de la función en esas zonas ha de hacerse con una resolución mayor en los puntos (x_i, y_j) que conforman el mallado trazado en Ω para la resolución:

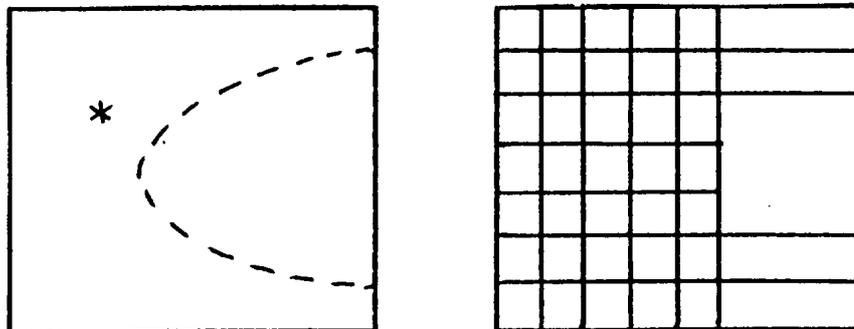


Fig. 7. -

Este es el mismo fenómeno que se tiene en la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias por medio de un método de paso variable, por ejemplo, un algoritmo del tipo Fehlberg adaptado a un método de Runge-Kutta.

Para el caso que nos ocupa se optó por un método de elementos finitos que describimos brevemente.

La aplicación de los métodos de elementos finitos se basa en la formulación de un problema variacional equivalente a la ecuación dada junto con las condiciones de contorno. Por regla general el problema variacional originará soluciones débiles en los espacios adecuados definidos, fundamentalmente, por las condiciones de contorno. En el n° IV.2.1 ya se ha hecho referencia a este hecho.

Para este caso la ecuación dada es:

$$v_1 \frac{\partial T}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{K}{2} \nabla^2 T = -1 \quad (1)$$

Seleccionando en Ω un espacio D de funciones de soporte compacto (funciones test) e introduciendo el producto escalar definido por

$$(u,v) = u.v = \int_{\Omega} uv \, dx \, dy$$

Podemos escribir, para todo $w \in D$:

$$\int_{\Omega} \left(v_1 \frac{\partial T}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{K}{2} \nabla^2 T \right) w \, dx \, dy = - \int_{\Omega} w \, dx \, dy \quad (2)$$

que representamos abreviadamente como:

$$(LT, w) = (-1, w)$$

Esta es la formulación variacional del problema (aún sin incorporar las condiciones de contorno): Ello quiere decir que la solución del problema original es la $T(x,y)$ que hace mínimo el valor del producto escalar. Para incorporar las condiciones de contorno utilizamos integración por partes en el primer miembro de (2) y eliminamos las integrales extendidas a la frontera Γ , quedando:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \left(v_1 \frac{\partial T}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) w \, dx \, dy + \frac{K}{2} \int_{\Omega} (\text{grad } T \cdot \text{grad } w) \, dx \, dy = \\ = - \int_{\Omega} w \, dx \, dy \end{aligned} \quad (3)$$

Por tanto, las soluciones del problema variacional se han de buscar en el espacio $H_0^1(\Omega)$ de las (clases de) funciones

nulas en Γ y que poseen primeras derivadas débiles en Ω . Para resolver numéricamente se ha de usar alguna variante de los teoremas de inmersión de Sobolev (Pacheco, 1983), que indica lo siguiente: Los elementos del espacio de soluciones se pueden aproximar mediante funciones continuas:

$$T \in H_0^1(\Omega) \Rightarrow \exists \lambda_j \mid T = \sum \lambda_j w_j \quad (4)$$

siendo w_j un conjunto adecuado de funciones definidas en Ω .

En las aplicaciones se suele tomar para w_j funciones definidas de modo que sólo en un entorno de un punto sean no nulas y son 0 en el resto, por ej. funciones lineales a trozos del tipo siguiente (en dim 1):

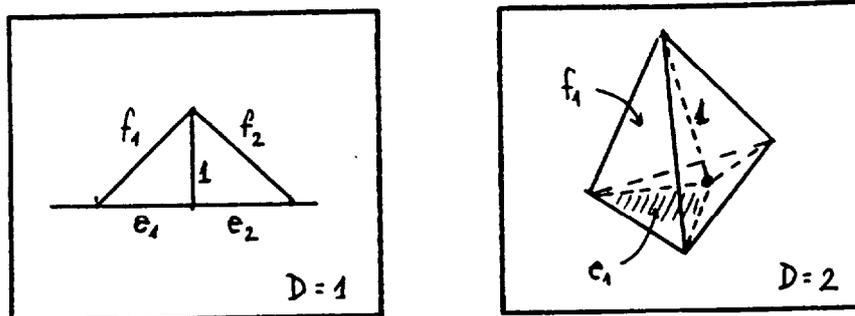


Fig. 8. -

Estas funciones se llaman funciones de interpolación definidas sobre los elementos finitos asociados a una partición de Ω mediante un mallado.

Sustituyendo la expresión (4) convenientemente truncada en la ecuación (3) y restando de la forma original de ésta ob-

tenemos el residuo. Este residuo debe ser minimizado, y ello depende de la elección de las funciones de interpolación, de los elementos finitos y de las funciones test, así como de la ecuación de que se trate. El resultado final es un sistema de ecuaciones lineales algebraico para los coeficientes λ_j (obsérvese que j es aquí un multiíndice de orden 2) que, resuelto, nos dará los valores que se usan para dar el valor aproximado de T en los nodos del mallado. Para los puntos fuera del mallado la forma concreta de los elementos finitos provee la interpolación adecuada.

El método utilizado aquí emplea elementos finitos triangulares con funciones de interpolación lineales. Esto es, en cada elemento finito se define una función de 2 variables que representa un plano: Ello quiere decir que la superficie T es aproximada mediante un poliedro.

A partir de un mallado mínimo, con pocos nodos, el método calcula una primera aproximación de $T(x,y)$, y tras una comprobación genera un submallado más fino en las zonas de Ω donde resulta necesario. Este proceso ha sido desarrollado en la ETSII de Las Palmas por el Departamento de Matemáticas (ver Montenegro, 1989; Montero, 1989). Se denomina código adaptativo Neptuno.

El mallado mínimo y su posible evolución se representan en la Figura 9.

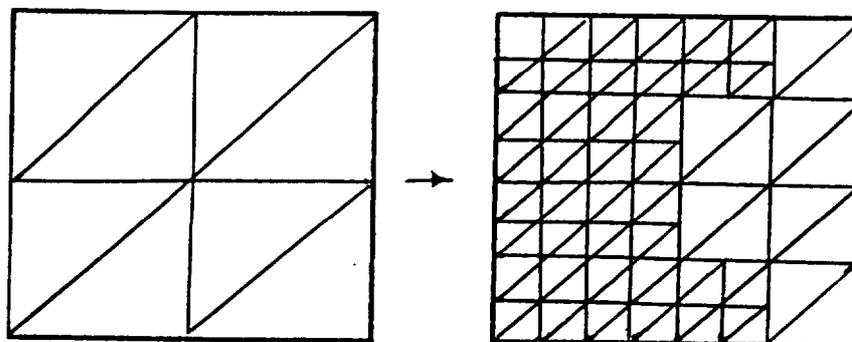


Fig. 9. -

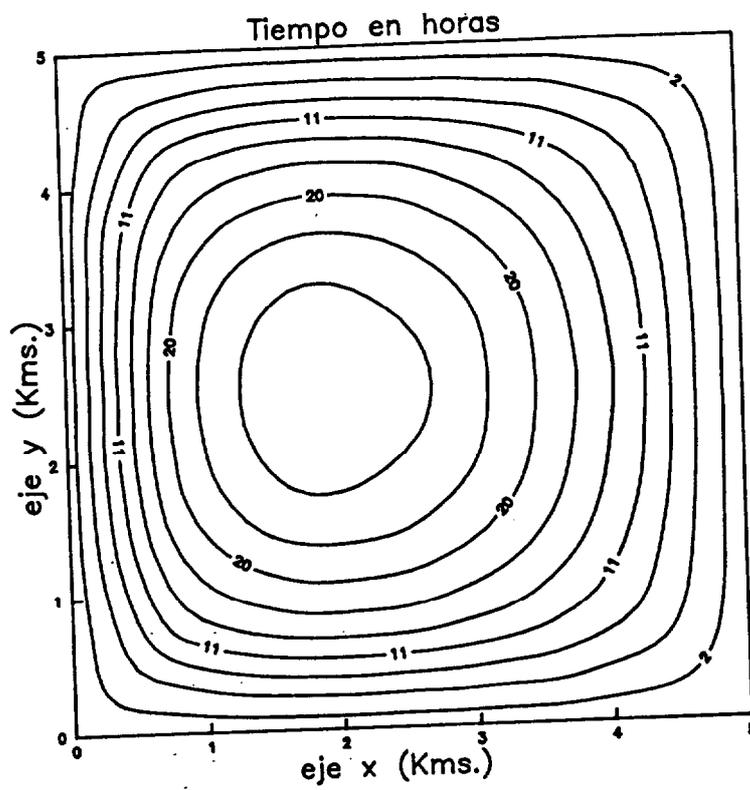
A través de una interfaz puede seleccionarse el número de refinamientos del mallado, el tipo de método de evaluación de los residuos para el cómputo de los errores cometidos y el método de resolución del sistema lineal algebraico resultante, así como otras características de entrada y salida de datos. El método ha sido probado con éxito en problemas más complejos que el que nos ocupa en este trabajo y es objeto de investigación por parte del grupo de la ETSII del Departamento de Matemáticas para su perfeccionamiento.

En el apartado siguiente se presentan gráficamente los resultados de la aplicación del método a las diferentes situaciones.

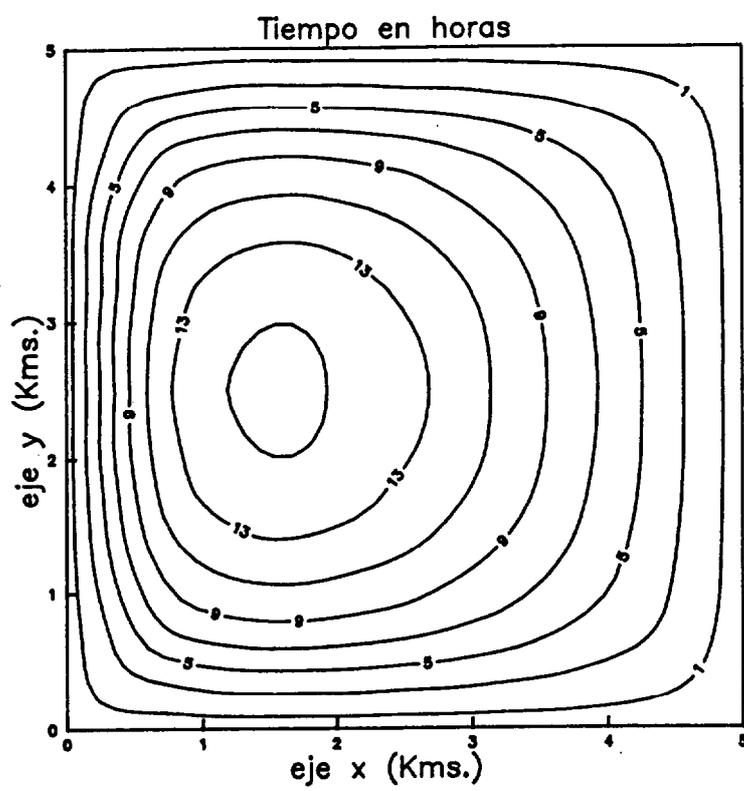
V.3. Representaciones gráficas.

En las páginas que siguen se presentan los resultados de los experimentos numéricos realizados. Se han seleccionado los 10 casos que parecen más interesantes, con objeto de su posterior interpretación. Desde el punto de vista de la legibilidad de los resultados se ha optado por la representación mediante curvas de nivel, cuya lectura es sencilla: Dado $(x,y) \in \Omega = [0.5] \times [0.5]$, el valor representado es el tiempo medio de salida de Ω (en horas) de una partícula depositada en (x,y) cuando los parámetros de la ecuación son los que se citan en el encabezamiento de la gráfica, y que se corresponden con los expuestos en el apartado 1 de este mismo capítulo.

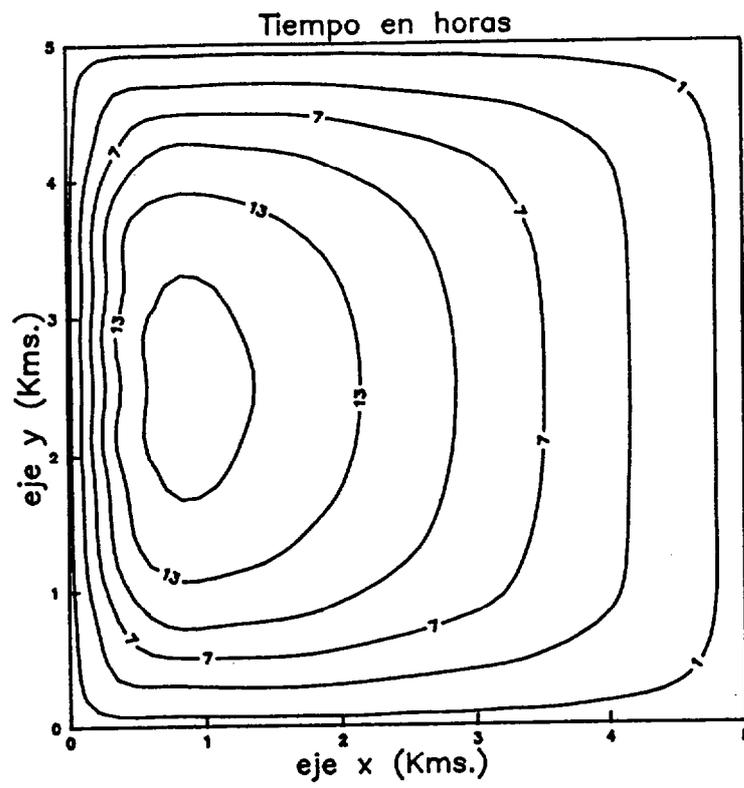
Caso Primero: $v=(1,0)$; $K=3$



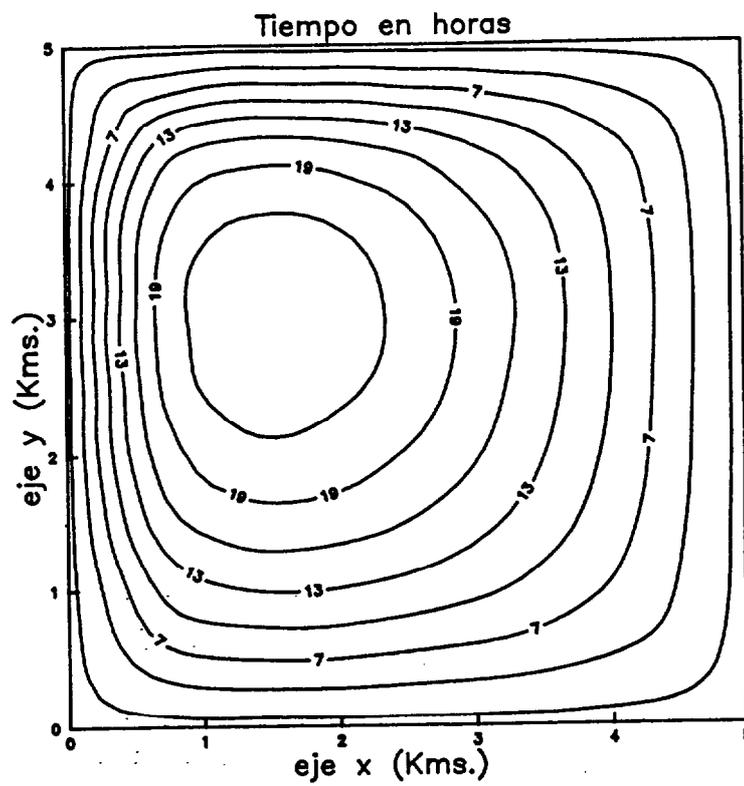
Caso Segundo: $V=(3,0)$; $K=5$



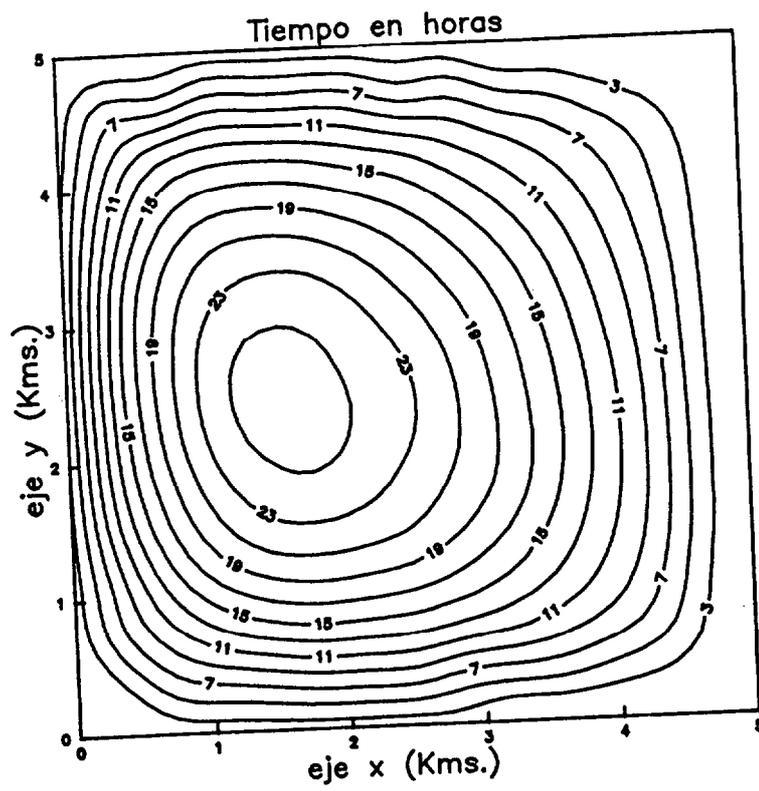
Caso Tercero: $V=(5,0)$; $K=3$



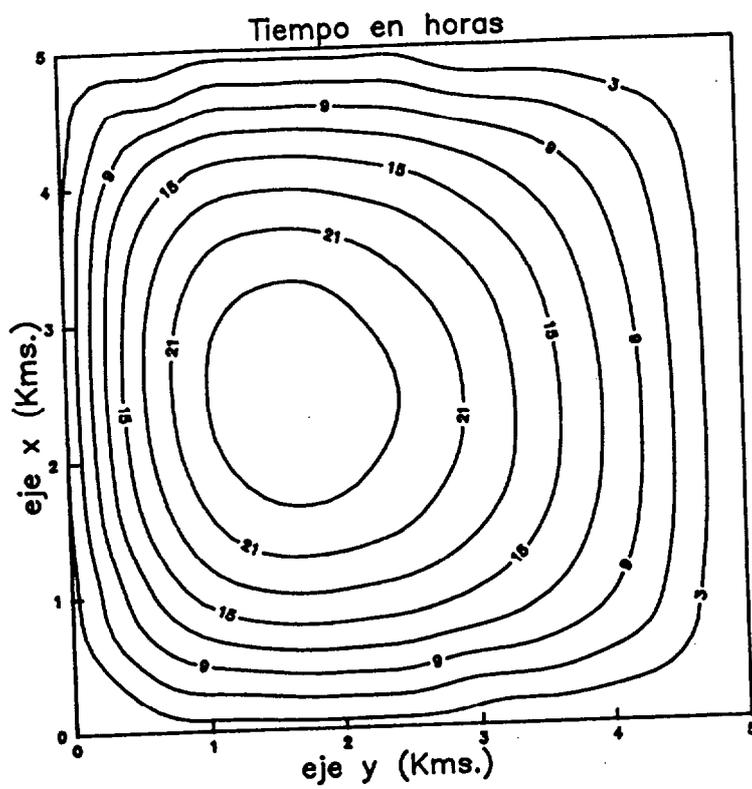
Caso Cuarto: $V=(2,-1)$; $K=3$



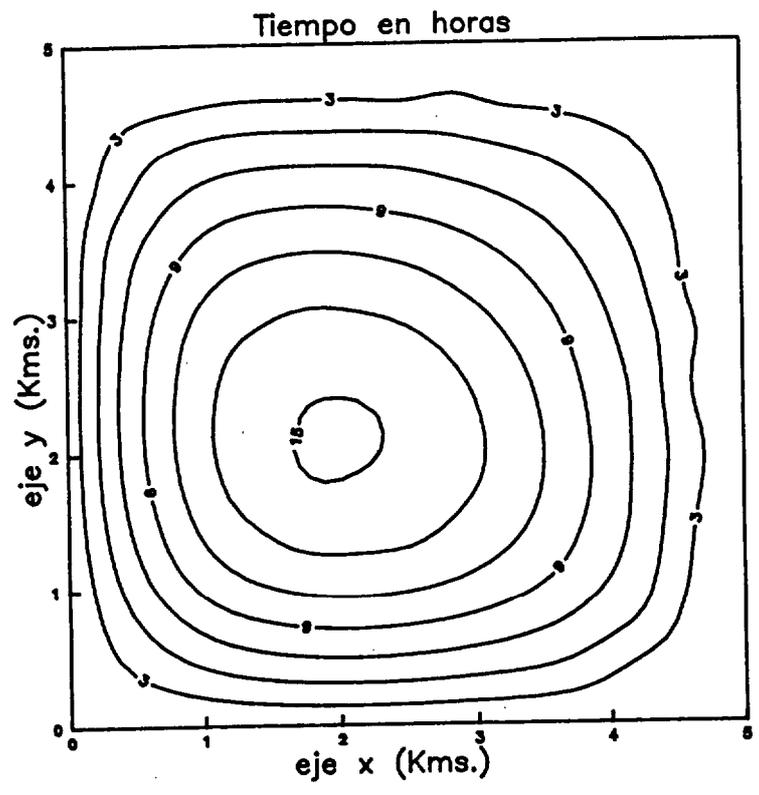
Caso Quinto: Perfil Lineal Paralelo, $K=3$



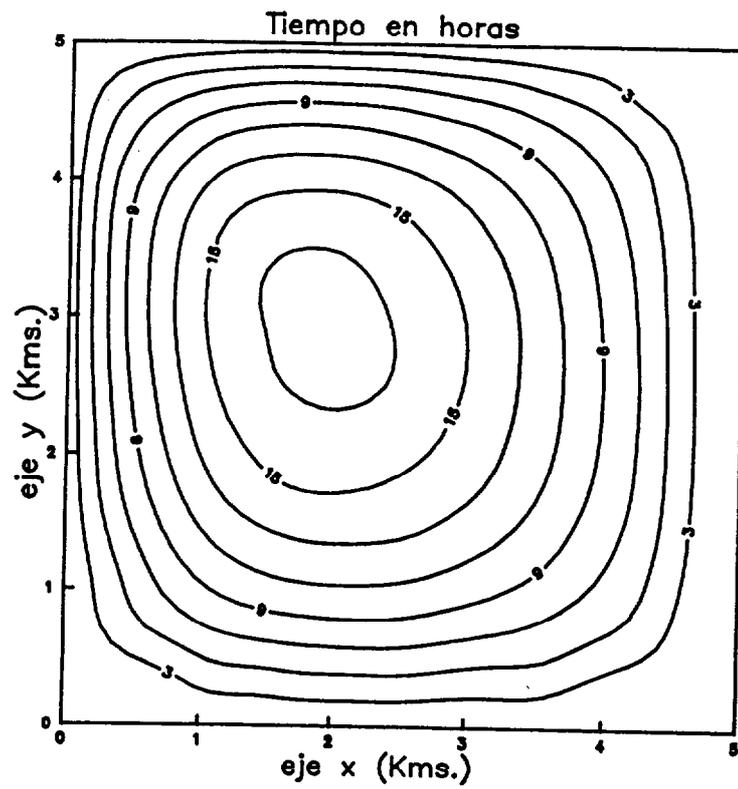
Caso Sexto: Perfil Parabolico Paralelo; $K=3$



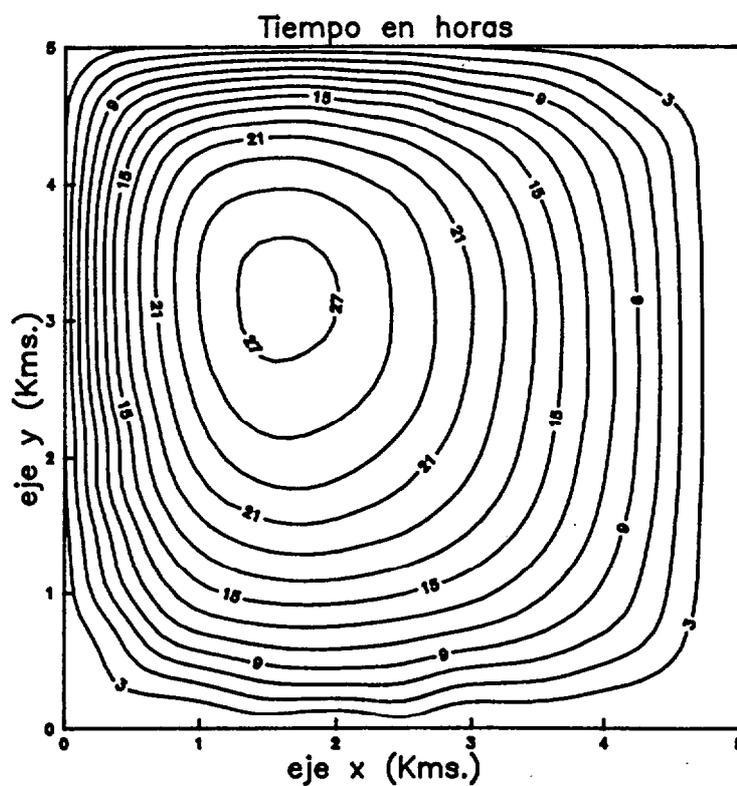
Caso Septimo: Perf. Obl. Lin. Pos.; K=5



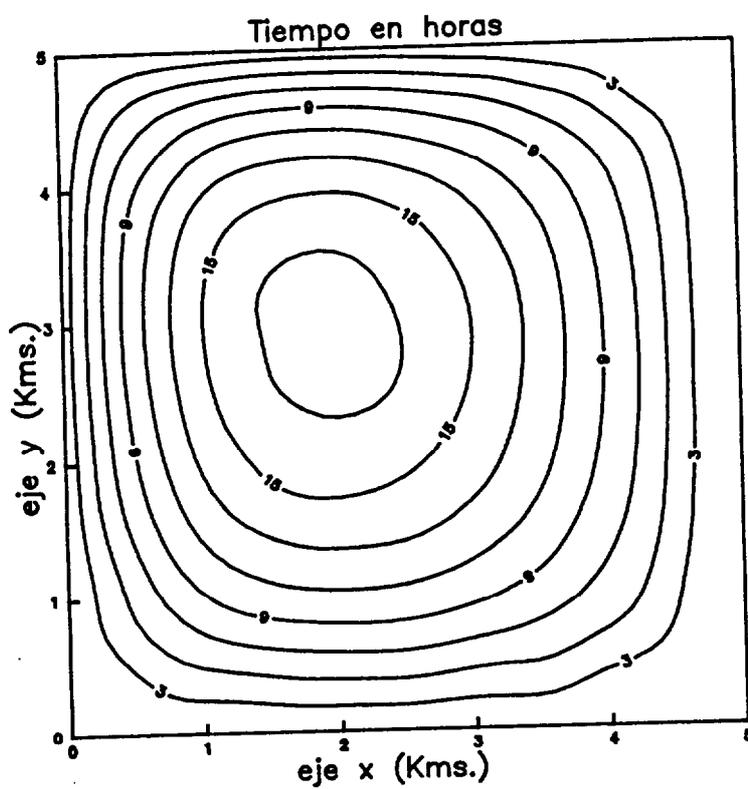
Caso Octavo: Perf. Obl. Lin. Neg.; $K=5$

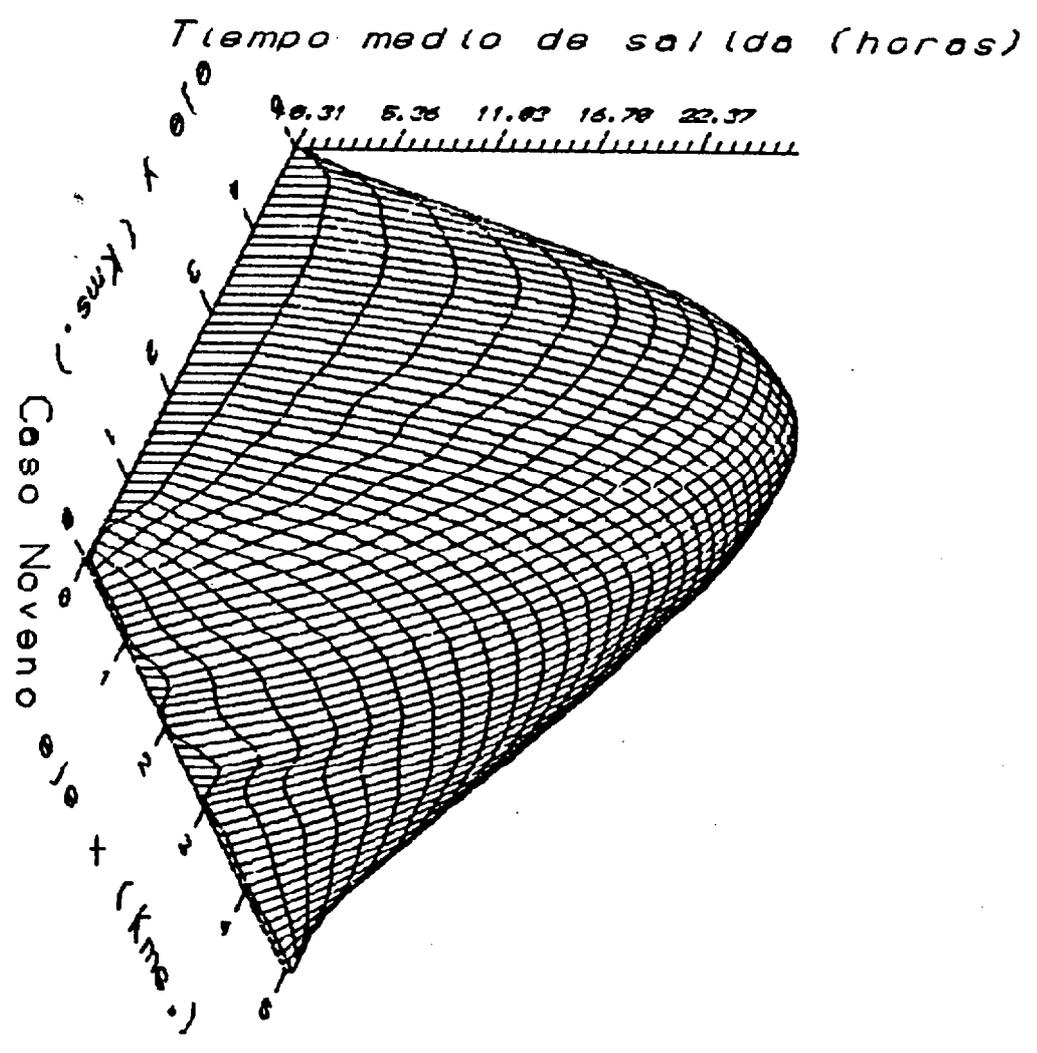


Caso Noveno: Perfil Par., Neg.; $K=3$



Caso Decimo: Perfil Par., Neg.; K=5





VI.
CONCLUSIONES

En este capítulo se extraen las conclusiones obtenidas en relación a los objetivos planteados en la introducción de este trabajo.

Acerca del objetivo (a) se puede concluir que la información social sobre cuestiones medioambientales tiene una importante presencia en la prensa local. Además presenta muchas veces una evolución cíclica con respecto al tiempo, como cíclicos se pueden considerar algunos problemas relacionados con el medio ambiente, en concreto con el litoral, si tenemos en cuenta que muchos de ellos no encuentran fácilmente una solución definitiva. En este sentido, la actitud social se puede considerar un simple reflejo de una situación.

En definitiva, el rápido aumento de la población en la isla de Gran Canaria a partir de la década de los 60 y la tendencia, cada vez mayor, de la población a situarse en torno al litoral, ha generado un importante problema en relación con la eliminación de residuos. A esto hay que añadir la limitada disponibilidad de terreno y la alta densidad de población de la isla. Consecuencia de todo ello es que los habitantes de Gran Canaria se vean directamente afectados por este tipo de problemas, además de otros relacionados, y sobre todo por sus consecuencias. Y, evidentemente, esto se refleja en la prensa local.

Esta primera parte del trabajo nos ha permitido, por tanto, justificar la importancia y oportunidad del desarrollo posterior.

En relación al objetivo (b) se ha hecho una revisión bibliográfica, tanto en lo referente a la gestión de los residuos y sus implicaciones como relativa a los antecedentes de modelos

matemáticos relacionados con la gestión del medio ambiente, en concreto con la eliminación de residuos. En particular se refleja el interés por los modelos con componentes estocásticas, así como sus aplicaciones y resultados. Se ha puesto de relieve en esta cuestión la diferencia conceptual existente entre las modelos clásicos a base del estudio de concentraciones o diluciones y esta otra vía consistente en el seguimiento individual de partículas, práctica habitual en parte de la bibliografía consultada. Es también común la construcción de modelos considerando procesos aleatorios, y basados en funciones de probabilidad.

Sobre el objetivo (c) se ha formulado un modelo bidimensional para estimar el tiempo medio de permanencia de una partícula depositada en una zona Ω y sometida a los efectos combinados de advección y difusión. El modelo es el siguiente:

$$v_1 \frac{\partial T_s}{\partial x} + v_2 \frac{\partial T_s}{\partial y} + \frac{1}{2} K \nabla^2 T_s = -1$$

$$T_s(x,y) = 0 \quad \text{si } (x,y) \in \partial\Omega$$

También se han estudiado variantes del modelo para tener en cuenta otros fenómenos relacionados, formulándose aproximaciones teóricas a las siguientes:

- Problema del tiempo medio de salida por una zona específica de la frontera.
- Problema de la delimitación de una zona prohibida para los vertidos.

Respecto al objetivo (d) se han seleccionado y resuelto numéricamente diez casos mediante un esquema adaptativo de elementos finitos. Los resultados concuerdan con lo que se preveía teóricamente, en el aspecto de las funciones solución $T_g(x,y)$.

En la página siguiente se muestran las características esenciales de los cálculos efectuados.

CASO	CARACTERISTICAS ⁽¹⁾	T _{MAX} ⁽²⁾	LOCALIZACION ⁽³⁾
1	v = (1,0); K = 3	27.9	(2.02;2.5)
2	v = (3,0); K = 5	15.47	(1.54;2.5)
3	v = (5,0); K = 3	17.23	(0.83;2.5)
4	v = (2,-1); K = 3	24.51	(1.54;3.1)
5	v lineal paralelo; K = 3	25.9	(1.54;2.38)
6	v parabólico paralelo; K = 3	26.26	(1.54;2.5)
7	v oblicuo lineal posit.; K = 5	15.25	(1.9;2.0)
8	v oblicuo lineal negat.; K = 5	17.77	(1.9;2.97)
9	v oblicuo paralelo negat.; K = 3	27.75	(1.67;3.21)
10	v oblicuo paralelo negat.; K = 5	17.85	(1.9;2.97)

Tabla VI.1.- Resumen de los resultados de los experimentos numéricos del modelo.

(1) v se expresa en km/día y K en km²/día.

(2) T_{MAX} se expresa en horas.

(3) Coordenadas del punto van en kms.

En la Tabla VI.1 observamos lo siguiente:

1. Comparando los casos 1 y 2 se tiene que el coeficiente de difusión posee un papel importante en la aceleración del proceso de eliminación de la partícula de la zona Ω : El paso de $K=1$ a $K=5$ hace descender un 45% el tiempo máximo estimado.

Los casos 2 y 3 muestran la influencia relativa de las partes advectiva y difusiva: Indican que es más importante la variación en K que en el módulo de v .

2. En general se observa que a los coeficientes de difusión altos les corresponde un descenso sustancial del tiempo de salida. En efecto, comparando 9 y 10 vemos que para el mismo campo de velocidades, un aumento de K de 3 a 5 (66%) se traduce en un descenso del 36% del tiempo de salida.
3. Los casos en que se utiliza para $v = (v_1, v_2)$ la expresión perfilada $(a+by, 0)$, caso lineal 5, ó $(c+d.y, 0)$, caso parabólico 6, pueden pensarse como casos promedio. En el caso (5) la velocidad media es:

$$(v_1, 0) \text{ siendo } v_1 = \frac{1}{5} \int_0^5 (0.5 + 0.5y)dy = 1.75 \text{ km/día}$$

y ofrece resultados comparables a los del caso (1), al igual que el caso (6), donde

$$v_1 = \frac{1}{5} \int_0^5 (0.5 + 0.75 y)dy = 1.59 \text{ km/día}$$

y el resultado es aún más parecido al de (1). Ello quiere decir que el efecto de cizalla horizontal tiende a compensar el perfilado, haciéndolo equiparable a un valor promedio para v .

4. En ningún caso se observa una variación del orden de magnitud. Ello concuerda con las observaciones (Hdez. Brito, 1987). Los cambios en el orden de magnitud se deben a episodios violentos como temporales.
5. La ubicación del punto T_{MAX} refleja fundamentalmente el comportamiento de la parte advectiva en la ecuación del modelo. Así, para $v = (v_1, 0)$, T_{MAX} está situado en la recta $y = 2.5$. En los casos oblicuos se señala la procedencia de la corriente modelada por el vector v .
6. Los resultados provistos por el modelo, para situaciones estabilizadas como las que se han utilizado en los experimentos numéricos, concuerdan con los obtenidos por trabajos de campo. Aquí se han utilizado los resultados citados en Okubo et al. (1982) para efectuar las comparaciones. Los experimentos realizados por Okubo con trazadores obtienen un tiempo medio de vida de la mancha de Rhodamina-A para diferentes valores del coeficiente de difusión (de 2 a 7 $Km^2/día$) del orden de horas. Estos valores varían desde 1 hasta 5 ó 6 para una extensión de unos 3 Km^2 . En el modelo propuesto en este trabajo se utiliza una extensión de 25 Km^2 y con órdenes de magnitud similares. La tabla

citada más arriba (Tabla VI.1) indica resultados entre 14 y 27 horas, lo cual puede considerarse una aproximación razonable, debido a la enorme variabilidad de los datos experimentales disponibles .

VII.
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.

ABOAL GARCIA-TUNON, J.A. (1982), "Espacios litorales protegibles", en Coloquio Hispano-Francés sobre el litoral, Serv. Publ. Agrarias, Icona-Mopu, Madrid.

AKIN, J., (1982), "Application and implementation of finite element methods", Academic Press.

AMERICAN PUBLIC WORKS ASSOCIATION, (1976), "Tratamiento de residuos urbanos", Inst.Est.Adm.Local, Madrid.

ARACIL, J., (1978), "Introducción a la dinámica de sistemas", Alianza Ed., Madrid.

ARMSTRONG, J. y RYNER, P., (1981), "Ocean Management. A new perspective", Ann Arbor Science.

ARNOLD, L. (1974) "Stochastic Differential Equations", John Wiley, New York.

BALISTRIERI, L., BREWER, P. y MURRAY, J., (1981), Scavenging residence times of trace metals and surface chemistry of sinking particles in the deep ocean, Deep-Sea Research, 28A, (101-121).

BERRY, J.S. y OTROS, (1986), "Mathematical modelling methodology, models and micros", Ellis Horwood Limited.

BRAAT, L. y VAN LIEROP, W., (1986), Economic-Ecological modelling. An introduction to methods and applications, Ecol. Modelling, 31, (33-44).

CAPUZZO, J.M., (1987), Ecological and human health concerns of wastes, Marine Pollution Bulletin, 18-3, (107-109).

CARTER, R.W.G., (1988), "Coastal Environments", Academic Press, London.

CEDOC (1987), "Estadísticas básicas de Canarias 1980-1985", Las Palmas de G.C.

CEDOC (1989), "Monografías Estadísticas", Canarias.

CEDOC (1989), "Boletín Estadístico de Coyuntura", Canarias.

CHANLETT, E., (1976), "La protección del medio ambiente", Inst.Est.Adm.Local, Madrid.

CLARK, R.B. (1984) "Marine Pollution", Oxford U.Press.

COSTA-MORATA, P., (1982), Tipología de la conflictividad en el litoral, En Coloquio Hispano-Francés sobre el litoral, Serv. Publ. Agrarias, Icona-Mopu, Madrid.

COX, D. y MILLER, M., (1965), "The theory of stochastic processes", Chapman and Hall, London.

CRABTREE, R. y otros, (1987), Mathematical modelling requirements for river quality control, Wat.Pollut.Control, 86-1, (51-58).

CRIADO, A., (1978), Métodos de análisis multivariante en Ecología. Aplicaciones a una comunidad herbácea heterogénea, Tesis, Universidad de Sevilla.

CRONK, J., MITSCH, W. y SYKES, R., (1990), Effective modelling of a major inland oil spill on the Ohio River, Ecological Modelling, 51, (161-192).

DEVINE, M.F., NORTON, M.G. y CHAMP, M.A., (1986), Estimating particulate dispersiveness and acumulation at nearshore ocean dumpsites, Marine Pollution Bulletin, 17-19, (447-452).

FEISTEL, R. y EBELING, W. (1989) "Evolution of comple: systems", Kluwer Ed. Dordrecht.

FERNANDEZ, I., (1988), Contribución a la modelización de eliminación de residuos sólidos por vía marina, Tesis, Universidad Politécnica de Canarias.

FIFE, R., (1979), "Mathematical aspects of reacting and diffusing systems", Springer, Berlin.

FORMAN, R. y GODRON, M., (1986), "Landscape Ecology", Wiley, New York.

FRIAS, A y MORENO, G. (1978) "Ingeniería de Costas", Limusa, México.

GABRIC, A., (1986), An optimal source depth for effluent discharge in turbulent open channel, Marine Pollution Bulletin, 17-2, (63-64).

GARCIA-NOVO, F., (1981), Efectos ecológicos del equipamiento turístico, en Coloquio Hispano-Francés sobre espacios litorales, Serv. Publ. Agrarias, Icona-Mopu, Madrid.

GARDINER. C. (1983), "Handbook of stochastic methods", Springer Verlag, Berlin.

GONZALEZ, A. y MARTIN, J.F., (1982), "Investigación. Agricultura y espacio rural en Gran Canaria", Universidad de La Laguna, Secretariado de Publicaciones.

GOTTINGER, H.(1986) A computational model for solid waste management with applications. Appl. Math. Modelling, 10, (330-338).

GULDMANN, J.M. (1986), A structural framework for the design of integrated environmental and land-use optimization models. Math. Modelling, 7,(61-81).

GRUSA, K., (1988), "Mathematical analysis of nonlinear processes", Pitman, New York.

HARRIS, C.J., (1978), River quality models near effluent outfalls, En Mathematical modelling of turbulent diffusion in the environment, Academic Press, (459-496).

HERNANDEZ BRITO, J.J., (1987), Modelo bidimensional de advección-difusión de contaminantes. Aplicación a un vertido urbano en aguas costeras, Tesis, Universidad de La Laguna.

HERRAEZ, I. et al. (1989) "Residuos urbanos y medio ambiente", Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid.

JACKSON, G., (1990), A model of the formation of marine algal flocs by physical coagulation processes, Deep-Sea Res., 37-8, (1197-1211).

LANDE, R. y WOOD, M., (1987), Suspension times of particles in the upper ocean, Deep-Sea Res., 34-1, (61-72).

LEUNG, A., (1988), "Systems of nonlinear partial differential equations", Ed. Kluwer, Dordrecht.

LIONS, J.L., (1961), "Equations Differentielle Operationnelles", Springer Verlag, Berlin.

LOTKA, A.J., (1924), "Elements of Physical Biology" (Ed. 1956: "Elements of Mathematical Biology", Dover, New York.

McKELVEY, R., (1985), "Environmental and natural resource mathematics", AMS, Providence, Rh. I.

MACHADO, A., (1990), "Ecología, medio ambiente y desarrollo turístico en Canarias", Consejería de la Presidencia, Gobierno de Canarias.

MALAVE, J (ed.), (1988), "La gestión ambiental, ¿impulso o freno al desarrollo?", Ed. IESA, Caracas.

MARCELLAN, F., CASASUS, L. y ZARZO, A., (1990), "Ecuaciones Diferenciales", McGraw Hill.

MARSHALL, G., (1978), "Métodos numéricos en la mecánica del continuo", Ed. Universitaria de Buenos Aires.

MARTIN-RUIZ, J. (1989), "El Noroeste de Gran Canaria", Ediciones del Cabildo Insular de Gran Canaria

MAYNARD SMITH, J., (1978), "Models in Ecology", Cambridge University Press.

MONTENEGRO, R., MONTERO, G., FERRAGUT, L. y WINTER, G., (1989), Aplicación de métodos de elementos finitos adaptativos a problemas de convección-difusión, Rev.Int. Met.Num.Calc.Dis.Ing., 5, 4, (535-560).

MONTENEGRO, R., (1989), Aplicación de métodos de elementos finitos adaptativos a problemas de convección difusión, Tesis, Universidad Politécnica de Canarias.

MONTENEGRO, R., WINTER, G. y FERRAGUT, L., (1990), Aplicación de esquemas EBE en procesos adaptativos, Rev.Int.Mét. Num.Cálc.Dis.Ing., 6, 2, (311-332).

MONTERO, G., (1989), Aplicación de los esquemas elemento a elemento a la resolución de sistemas de ecuaciones asociados a métodos adaptativos de elementos finitos, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Canarias.

MOPU, (1989), "Gestión de residuos sólidos", Subsecretaría de ordenación del territorio y medio ambiente.

MURTHY, C., SIMONS, T., LAM, D., (1986), Simulation of pollutant transport in homogeneous coastal zones with application to Lake Ontario, Journal of Geophysical Research, 91, (9771-9779).

NEUMANN, G. y PIERSON, W. (1966) "Principles of Physical Oceanography", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

O'KANE, J., (1988), On some problems in the modelling of coastal zone processes with particular reference to sewage disposal. En: Zienkiewicz y Schrefler, 1988, (45-56).

OKUBO, A., (1980), "Diffusion and ecological problems: Mathematical models", Springer, Berlin.

OKUBO, A., CARTER, H., y OTROS, (1982), "A lagrangian and eulerian diffusion study in the coastal surface layers", SUNY at Stony Brook, New York.

PACHECO, J., con HERNANDEZ, E. y GARCIA, R., (1983), Métodos numéricos en la revisión del tiempo, Rev.de Geofísica (CSIC), 3a, (151-164).

PACHECO, J. y FERNANDEZ, I., (1988), El reciclado de aguas como conjunto de problemas de control, Tecnología del agua, 44, (19-24).

PACHECO, J.M. y FERNANDEZ, I., (1988), Modelling and computing settling times for suspended particles in the ocean. En: Zienkiewicz y Schrefler 1988, (369-376).

PACHECO, J., SANTANA, A., FERNANDEZ, I. y MARTELL, E.P., (1990), Predictability of GFD variables through checking of chaotic behaviour in previous records", Ann.Geophys. (esp. issue), p.314.

PACHECO, J. y PADILLA, I., (1990), Un modelo de reacción-difusión: Aplicaciones a las pesquerías, I Congreso sobre Oceanografía y Recursos Marinos en el Atlántico Centro-oriental, Las Palmas de G.C. (En prensa).

PADILLA, I., (1982-90), Archivo de artículos sobre medio ambiente en Canarias, Colección del Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias del Mar.

PADILLA, I. y otros, (1989), Aplicaciones del primer tiempo de paso a problemas de contaminación marina, Actas XIV Jornadas Hispano-Lusas de Matemáticas, Vol.II, 1005-1009, Tenerife.

PADILLA, I. y otros, (1990), Simulación de trayectorias verticales de partículas en la capa de Ekman, Actas XV Jornadas Hispano-Lusas de Matemáticas, Universidad de Evora (En prensa).

PADGETT, W. et al., (1977), A random differential equation approach to the probability distribution of BOD and DO in streams, Siam J. Appl. Math., 32-2, (467-483).

PADGETT, W.J., (1980), A survey of stochastic models for BOD and DO in streams, en Adomian (ed), Applied stochastic processes, Academic Press.

PATRY, G. y CHAPMAN, D., (1989), "Dynamic modelling and expert systems in wastewater engineering", Lewis Publishers, Michigan.

PLAN INSULAR DEL TERRITORIO, Avance, (PIOT), (1990), Cabildo Insular de Gran Canaria.

POND, S. y PICKARD, G. (1978), "Introductory dynamical oceanography", Pergamon, Oxford.

QUETIN, B. y DE ROUVILLE, M., (1986), Submarine sewer outfalls, Marine Pollution Bulletin, 17, 4 (133-183).

QUINTANA, F., (1985), "Pequeña historia del Puerto de Refugio de la Luz", Ed. de la Mancomunidad de Cabildos de Las Palmas.

RICCIARDI, L.M., (1977), "Lecture notes in Biomathematics", Springer-Verlag, Berlin.

RISKEN, H., (1984), "The Fokker-Planck equation", Springer, Berlin

RODRIGUEZ, C., (1988), "Un modelo matemático para distribuciones manchosas en el oceano", Tesis, Universidad Politécnica de Canarias.

RODRIGUEZ, C., SANTANA, A. y MARTELL, E.P., (1990), Un modelo estocástico para la dispersión de partículas en la capa de Ekman, Memorias I Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, (164-168), Las Palmas.

SEINFELD, J y LAPDUS, L., (1974), "Mathematical Methods in Chemical Engineering", Vol. 3., Prentice-Hall, N.Y.

SISSONS, C. et al., (1986), A new approach to the mathematical analysis of biodegradation processes. Appl.Math. Modelling, 10, (33-40).

STRANG y FIX, (1973), "An analysis of the finite element method", Prentice Hall, N.J.

SPLIID, H. et al.,(1982), Empirical models for the spread of spills in marine environments, en Anderson (ed), Time Series Analysis I, North-Holland, Amsterdam.

TUNG, Y. y HATHORNE, (1989), Determination on the critical locations in a stochastic stream environment, en Ecological modelling,

TUNG, Y., (1990), Evaluating the probability of violating dissolved oxygen standard, *Ecological modelling*, 51, (193-204).

WAN, F. (1989), "Mathematical Models and their Analysis", Harper and Row, New York.

WESTMAN, W., (1985), Control de sustancias tóxicas, en *Ecology, Impact Assessment and Environmental Planning*, Wiley, New York.

WEYL, P.K. (1982), Simple information Systems for Coastal Zone Management. *Coastal Z. Man. J.* 9-2 (155-182).

WOMACK, S.J., (1986), Pollution in an historical context, *The School Science Review*, 67-240, (476-479).

VOIGT, A. y WLOKA, J., (1975), "Hilberträume und elliptische differential-operatoren", B.I.Verlag, Zürich.

ZIENKIEWICZ, O.C. y SCHREFLER, B.A. (eds.), (1988), "Computer modelling in ocean engineering", Balkema, Rotterdam.

ZIENKIEWICZ, O.C., (1980), "El método de los elementos finitos", Reverté, Barcelona.