



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES EN EL
MAR MEDIANTE DESCARGAS
SUBMARINAS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

LUIS BRAVO DIAZ

MEXICO, D. F.

1986.



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

| | |
|---|----|
| PRESENTACION | 1 |
| 1. INTRODUCCION | 2 |
| 1.1 Efectos de una descarga de aguas residuales en un cuerpo de agua | 4 |
| 1.2 Consecuencias de las descargas de aguas residuales al mar | 7 |
| 1.3 Necesidad de tratamiento | 10 |
| 2. INFORMACION BASICA | 14 |
| 2.1 Caracterización del medio marino | 14 |
| 2.1.1 Oceanografía física | 15 |
| 2.1.2 Oceanografía química | 36 |
| 2.1.3 Oceanografía biológica | 41 |
| 2.1.4 Oceanografía geológica | 49 |
| 2.2 Caracterización de las aguas residuales | 59 |
| 2.2.1 Programa de muestreo | 63 |
| 2.2.2 Cantidad de aguas residuales generadas | 65 |
| 2.2.3 Estimación de la calidad futura de aguas residuales | 68 |
| 2.2.4 Normas para la disposición de aguas residuales al mar | 68 |
| 3. DIFUSION DE AGUAS RESIDUALES EN EL MAR | 75 |
| 3.1 Dilución inicial | 78 |
| 3.2 Dilución por transporte | 81 |
| 3.3 Dilución por decaimiento | 84 |
| 3.4 Análisis sanitario de requerimientos de dilución | 85 |
| 3.4.1 Análisis de la dilución de una descarga en un medio sin estratificación | 87 |
| 3.4.2 Análisis de la dilución de una descarga en un medio estratificado | 89 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4. | DISEÑO DE EMISORES SUBMARINOS | 96 |
| 4.1 | Diseño hidráulico | 97 |
| 4.1.1 | Condiciones para el diseño de difusores | 97 |
| 4.1.2 | Desarrollo | 98 |
| 4.1.3 | Procedimiento de cálculo | 102 |
| 4.2 | Consideraciones estructurales | 105 |
| 4.3 | Materiales de las tuberías | 107 |
| 4.4 | Procedimiento constructivo | 114 |
| 4.5 | Sujeción al fondo marino | 122 |
| 4.6 | Supervisión y mantenimiento | 126 |
| 5. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 128 |
| | REFERENCIAS | 130 |

P r e s e n t a c i ó n

El objetivo de este trabajo es proporcionar los elementos fundamentales para el diseño de un sistema de disposición de líquidos residuales al mar mediante el empleo de un emisor submarino.

Dicho sistema permite obtener resultados satisfactorios en los procedimientos de saneamiento ambiental para ciudades costeras. Cabe aclarar que este trabajo se ha enfocado únicamente a las descargas de aguas residuales de origen doméstico y no incluye aspectos específicos de vertidos de aguas de origen industrial.

CAPITULO I

Introducción.-

El uso de los océanos como receptáculo de los desechos humanos se remonta desde los orígenes de la humanidad. Civilizaciones que fundaron ciudades en las costas han descargado sus aguas residuales a los mares por ser este el sitio con mayores ventajas, aunque cabe mencionar que cuando mucho se hacía mediante técnicas rudimentarias que dejaban mucho que desear en el aspecto sanitario (Ref. 15).

En la actualidad, la disposición de las aguas servidas generadas en ciudades costeras se continúa realizando, en la mayoría de los casos, en el mar inmediato y salvo contadas excepciones, sin ningún dispositivo o proceso que aminore el impacto en el medio receptor.

Nuestro país, con más de 10 000 km de litoral y un número creciente de centros urbanos e industriales asentándose a lo largo de ellos, se en-

frenta a la problemática de que actividades tales como el turismo y la pesca se lleguen a ver comprometidas en su aprovechamiento por falta de una planeación correcta de la disposición de las descargas de dichos centros, además de que representaría un grave riesgo para la salud de sus habitantes.

Es importante tomar en cuenta que a pesar de que el hombre ha utilizado al mar para sus descargas, la composición química de éste se ha mantenido esencialmente igual por más de un millón de años. Aún más, si se considera la enorme cantidad de materia orgánica y sedimentos transportados al mar por los ríos del mundo como resultado de procesos naturales, la contribución de aguas residuales del hombre es pequeña. Isaacs (Ref. 27.) observó que sólo la descarga fecal de las anchoas a las aguas costeras del sur de California era equivalente en contenido orgánico a las aguas residuales de cerca de 90 millones de personas y ésta es solamente una de cientos de especies de vida marina.

De aquí se puede deducir la enorme capacidad autodepuradora de los océanos.

Sin embargo, ocurren problemas cuando el hombre concentra los desperdicios en áreas restringidas.

Una descarga de aguas residuales mal planeada, por pequeña que ésta sea, puede causar en el entorno costero, los siguientes inconvenientes:

- Contaminación por bacterias y virus e infestación de parásitos en las playas, pudiendo ocasionar padecimientos gastrointestinales y enfermedades de la piel, entre otros.
- Inconvenientes de orden estético en playas y ensenadas, tales como malos olores y aspecto desagradable debido al afloramiento de materiales en suspensión y cuerpos flotantes.

- Perjuicios en actividades pesqueras y de cultivo de mariscos, ésta última cuando se afectan los estuarios.
- Efectos ecológicos adversos por la existencia de materia orgánica y microorganismos patógenos, así como de grasas y aceites cubriendo la superficie del agua.

Por el contrario, un emisor submarino apropiadamente diseñado provee de un mecanismo eficaz para la eliminación de las aguas residuales en cues tión, provocando diluciones inmediatas en el orden de 100 a 1 que reducen las concentraciones de materia orgánica y nutrientes a niveles tales que no presenten efectos ecológicos adversos (Ref. 27). Así también para los organismos patógenos que porta una descarga, el efecto dilucio nante de un emisor, aunado a la acción hostil del medio marino, provo ca rán su decaimiento.

1.1 Efectos de una descarga de aguas residuales en un cuerpo de agua.

Al ocurrir la incorporación de aguas residuales al cuerpo receptor, su efecto inicial será la degradación física de la calidad del agua. En la medida en que se activa esta degradación se produce la degradación química inducida biológicamente. Al mismo tiempo hay una degradación biológica manifestada por la afecta ción de la fauna acuática (Ref. 16).

A medida que transcurre el tiempo, la demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.) decrece su intensidad y la tasa de absorción de oxígeno desde la atmósfera se incrementa, con lo que el agua vuelve a ser clara, proliferan las algas que a su vez son productoras de oxígeno por fotosíntesis y reaparecen los peces, notablemente intolerantes a la contaminación, al restablecerse las condiciones primitivas. En este momento se dice que ha tenido lugar la recuperación del cuerpo receptor al completarse el

proceso de autodepuración antes descrito. Este proceso se realiza sin afectar gravemente al cuerpo, ya que la descomposición de la materia orgánica tiene lugar por acción bacteriana aerobia, sin producción de malos olores, sin cambiar mayormente el aspecto físico del agua y, si la concentración de oxígeno disuelto no baja de ciertos límites, sin afectar la vida de la biota acuática.

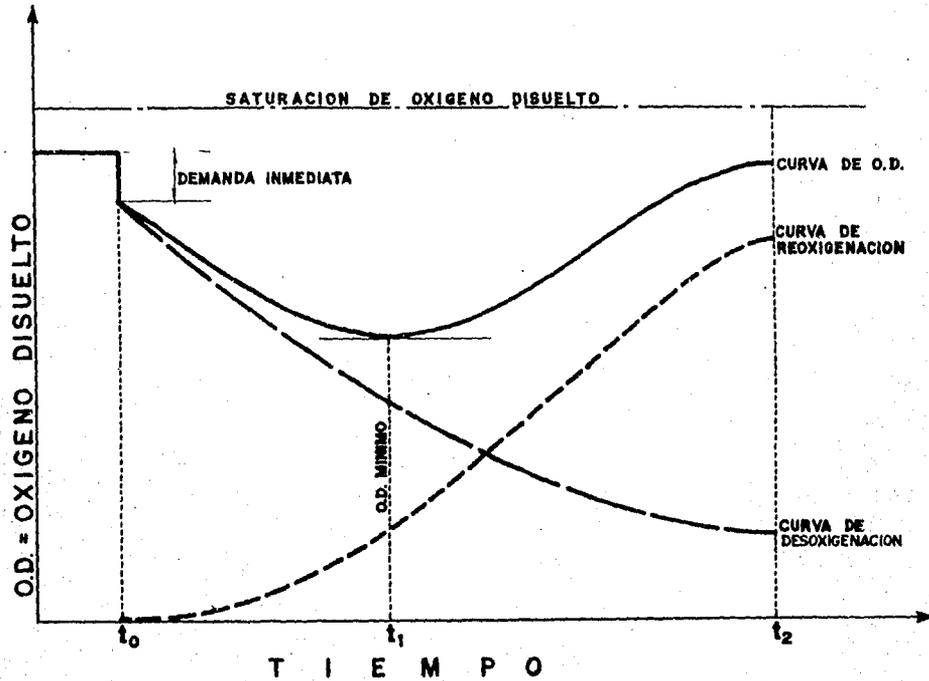
En la Fig. 1 se indica el proceso de autodepuración para cualquier cuerpo receptor con circulación de masas. En el instante t_0 se producen la descarga contaminante y una demanda inmediata de oxígeno, debida a las características de la descarga, que determinará un descenso inmediato de oxígeno disuelto, tanto como disponible haya. Luego sigue la curva de desoxigenación (rayada), que representa el oxígeno disuelto utilizado por las bacterias en su labor de descomponer la materia orgánica. El aumento de concentración de materia orgánica en el cuerpo receptor, debida a la descarga, estimula el desarrollo bacteriano y la oxidación de dicha materia, con el consiguiente consumo de oxígeno. Pero apenas el oxígeno disuelto disminuye de su valor normal, el proceso de aeración, representado por la curva de reoxigenación (punteada), permite la absorción del oxígeno de la atmósfera.

La suma de ordenadas de las dos curvas, de desoxigenación y de reoxigenación, determina la curva de oxígeno disuelto (trazo lleno).

Transcurrido cierto tiempo, y después de pasar por un mínimo en el tiempo t_1 , la curva de oxígeno terminará por alcanzar de nuevo las condiciones iniciales y el cuerpo receptor se habrá recuperado a lo largo de este proceso.

Sin embargo, este proceso se altera cuando la capacidad de reoxigenación del cuerpo receptor se ve sobrepasada con una mayor de—

FIGURA 1
PROCESO DE AUTODEPURACION



manda de oxígeno por parte de las bacterias descomponedoras de materia orgánica. Tal es el caso para cuerpos de agua con poco movimiento de masas, o una sobrecarga de materia orgánica, superior a la autodepurable.

1.2 Consecuencias de las descargas de aguas residuales al mar

Se ha descrito el primer y más patente efecto provocado por una descarga de aguas residuales en un cuerpo de agua. Sin embargo, es necesario abundar acerca de las consecuencias específicas que provocaría la disposición de residuos líquidos en el medio marino por una descarga sin control.

1. La baja en el contenido de oxígeno disuelto (O.D.) en el mar debida al aumento en la demanda que de dicho elemento manifiestan los microorganismos que degradan la materia orgánica, ya fue explicado en las páginas precedentes. La consecuencia directa de esto será la migración del necton y plancton, en busca de sitios que los provean de la cantidad suficiente, cuando el O.D. decaiga más allá de los 4 mg/l, límite que se ha establecido como la concentración mínima aceptable para cuerpos de agua que alojen organismos vivos. Los organismos que constituyen el bentos seguramente perecerán, si el déficit se torna intolerable, dada su incapacidad de locomoción.
2. La temperatura del mar es estable, con cambios de poco más de 7°C entre las estaciones extremas. Cualquier descarga que se efectúa en él alterará el entorno inmediato, ya que las aguas residuales domésticas generalmente tienen temperaturas superiores a las del ambiente. Dicha alteración se traduce principalmente como pérdida del oxígeno disuelto en el agua de mar. El valor promedio de este parámetro para nuestro país es del orden de 7 a 7.5 mg de O.D./l. Al aumentar la tempera

tura, disminuye el oxígeno disponible en el agua, con el consecuente efecto descrito en el párrafo anterior. Si la descarga fuera de aguas industriales, la modificación descrita sería mayor aún, por las características propias de éstas y probablemente por la reacción química de algunas sustancias con las sales del mar, que generarían calor.

3. El potencial hidrógeno (pH) define el grado de acidez o basicidad de cualquier sustancia. El mar es ligeramente básico, como se verá en el segundo capítulo, y dado que las aguas residuales de origen doméstico también lo son, este parámetro no representa riesgo importante para el ambiente marino. Las aguas industriales, con pH diferente de las anteriores, afectaría notablemente a la biota, por lo que se recomienda manejar dichas descargas de manera particular, de acuerdo al tipo de industria.
4. El efecto de las grasas y aceites, elemento propio de cualquier tipo de agua residual, se manifiesta en la formación de una capa superficial sobre el lugar de la descarga, que dificultará el intercambio gaseoso mar-atmósfera. Además de la escasa renovación de oxígeno por intercambio, la acción fotosintética que sobre la superficie del agua desarrolla el plancton se altera, al igual que el metabolismo de las especies superiores.
5. Las aguas residuales portan sólidos clasificados como materia sedimentable, flotante y en suspensión. En una descarga sin control, los sólidos sedimentables pueden llegar a afectar la ecología bental (sobre el fondo marino), mientras los sólidos suspendidos y flotantes reducen la transparencia de las aguas receptoras, con efectos retardantes del crecimiento de ciertas especies (Ref. 3). Además, el aspecto estético se ve alterado por la presencia de materia flotante.

6. En toda descarga de aguas residuales, la protección sanitaria por aplicar es la que primero se analiza. Para ello, el parámetro más manejado a nivel de proyecto y operación de cualquier dispositivo de control de la contaminación de las aguas, es la concentración de organismos coliformes, cuantificada en términos de *Escherichia coli*. Los coliformes pueden ser patógenos en el tracto urinario y causar infecciones en el aparato digestivo en caso de ingestión masiva (Ref. 3).

7. Los nutrimentos que portan las aguas residuales, integrados principalmente por nitratos y fosfatos, pueden ocasionar modificaciones en las relaciones de ambientes con escasa circulación, tales como bahías y estuarios.

Grace (Ref. 12) menciona algunos efectos: multiplicación prolífica de algas, que conllevan problemas de dermatitis en bañistas, olores desagradables, efectos biotóxicos, excesiva demanda de oxígeno en las cadenas alimenticias animales, entre otros. Sin embargo, el problema se reduce a efectos particulares cuando las aguas son estrictamente de origen doméstico y aún más si se disponen en mar abierto, donde la renovación de aguas es continua.

8. Las sustancias tóxicas que se llegan a presentar en la red de alcantarillado provienen de actividades industriales y agrícolas, contándose, entre los principales, los compuestos de mercurio, cromo, cadmio, arsénico, selenio, ocasionalmente plomo, así como compuestos fenólicos y pesticidas. Las consecuencias se traducen como su bioacumulación en los tejidos vegetales y animales, trastornando irremediablemente el metabolismo de las especies de las cadenas alimenticias. Dado que los peces son altamente proclives a acumular algunas sustancias tóxicas en sus tejidos, el riesgo que se corre por su consumo es ele-

vado. Además, la presencia de metales pesados ocasiona un decremento más marcado del oxígeno disuelto en el agua, debido a su reacción en el ambiente acuático. Nuevamente la ameritada recomendación de controlar las aguas residuales de cada industria, así como de los pesticidas en la agricultura.

En resumen, la disposición de residuos líquidos en el medio marino encara el riesgo de alterar la ecología del cuerpo receptor, si la descarga no se efectúa mediante un proceso adecuado que permita contrarrestar los efectos adversos que se han descrito.

De aquí la inquietud por exponer el uso de un emisor submarino y sus ventajas, para prevenir la degradación de las aguas costeras contiguas a los puertos.

1.3 Necesidades de Tratamiento.

La conveniencia de descargar aguas residuales al mar mediante un emisor submarino está en relación directa al fenómeno de dilución, basado éste en la capacidad de autodepuración que tiene el cuerpo receptor.

Cuando el grado de contaminación que tiene el efluente es superior a la capacidad de dilución para que actúe el proceso de autodepuración del cuerpo receptor, el líquido debe ser reducido en su carga contaminante y ello se logra mediante un tratamiento previo al vertimiento.

Los procesos de tratamiento aplicados se basan en los mismos procesos naturales que los de autodepuración, pero mientras éstos son más lentos y ocupan áreas grandes, los primeros son mucho más rápidos y pueden concentrarse en áreas mucho menores.

Es por ello que la simple dilución es considerada como un método

más de tratamiento.

Los métodos para tratamiento de líquidos consisten en procesos físicos, químicos y/o biológicos, dependiendo esto de la capacidad del cuerpo receptor para mantener el balance ecológico natural, en este caso el ambiente marino. Si las necesidades locales requirieran un reuso del líquido, su grado de tratamiento estaría en función de las características que demanden dicho reuso.

El sistema de recolección de líquidos residuales, conocido como red de colectores, es el servicio público más castigado por el usuario (Ref. 27). De allí que todo proceso de tratamiento debe ser precedido por una etapa preliminar, con el fin de retener sólidos voluminosos de origen diverso, como medida preventiva para evitar obstrucciones en conductos, deterioros en equipos de bombeo, válvulas, compuertas, etc.

Normalmente el tratamiento preliminar comprende la instalación de rejillas, trituradores y tanques desarenadores para retener sólidos que tienen gran acción abrasiva y además no juegan ningún rol en el proceso posterior, pero si obligaría a un innecesario manipuleo de la misma si no se le retuviera previamente. Simultáneamente con la eliminación de arena, puede lograrse en el mismo tanque la retención de materia flotante, como grasas y aceites.

Luego de este tratamiento preliminar, donde los elementos retenidos son procesados antes de su destino final, se inicia la etapa de tratamiento físico o conocido también como tratamiento primario. Este tiene la gran cualidad de constituir el más ventajoso y barato método para abatir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Los sedimentadores primarios, que constituyen el vehículo de tra-

tamiento, eliminan el líquido residual aproximadamente 90% de los sólidos sedimentables, un 60% de los sólidos suspendidos y un 30% de la DBO y la DCO (Ref. 16). Se les construye generalmente de planta circular con diámetros que van desde 15 m a 80 m y se les equipa con un barredor de fondo y otro superficial para espuma. También hay de planta rectangular y cuadrada. Si se llegara a requerir una mayor eficiencia en el tratamiento del líquido, será necesario recurrir al tratamiento biológico o secundario. Sin embargo, la inversión monetaria en instalaciones, equipo y operación que conlleva un tratamiento de este tipo no permitirá, para las condiciones económicas de nuestro país, vertir dicha inversión al mar.

Salas (Ref. 27). recomienda: América Latina no debe adoptar a priori, políticas oficiales establecidas por algunos países desarrollados que exigen el tratamiento secundario de aguas residuales (vertidas por emisores submarinos), a menos que haya una clara justificación. Muy por el contrario, en una situación de mar abierto, no compleja, la alternativa de los emisores submarinos en combinación con el pretratamiento sólo para material flotante, posee muchas ventajas sobre las soluciones convencionales que utilizan tratamiento secundario con descargas cercanas al litoral.

La práctica profesional en diferentes países permite hacer las siguientes consideraciones: la baja en la concentración de distintos parámetros de contaminantes alcanzada por efecto de un tratamiento primario y un emulsor de cierta longitud que alcance una adecuada profundidad de descarga es similar a la conseguida por un tratamiento secundario y un emisor de mucho menor longitud. Pero con éste último proceder se enfrenta al problema del manejo adecuado de la planta, que requiere de personal especialmente capacitado para operarla, así como a la disposición última de los lodos residuales, que implica, hasta hoy en día, una pesada car-

ga técnica y económica. En ocasiones se les llega a vertir por otro emisor al mar, contraviniendo exageradamente los objetivos de un emisor submarino, ya que la concentración de contaminantes que porta es infinitamente superior a la de una descarga de aguas crudas.

Por ello, aún cuando implique mayor inversión en obra civil el tender un mayor tramo de tubería submarina para alcanzar una profundidad óptima, en la que el fenómeno natural de dilución actúe, se recomienda a contrapartida del uso de un tratamiento secundario, complicado en su operación, que demanda una longitud corta de emisor.

La única justificación a inclinarse por el tratamiento secundario deberá ser porque un potencial reuso se tenga presente. Paradójicamente, en nuestro país, las zonas costeras con mayor población se caracterizan por no carecer de tan preciado líquido. Sin embargo, los estudios de uso futuro de suelo podrán ser decisivos para elegir el proceder más conveniente.

CAPITULO II

Información básica.-

Para realizar el diseño adecuado de un emisor submarino en ciernes, ya identificada la necesidad de su instalación, es requisito contar con una serie de datos que describan el ambiente donde se alojará y las características del agua que se descargará.

2.1 CARACTERIZACION DEL MEDIO MARINO

El ambiente marino posee infinidad de interrelaciones que le confieren un alto grado de complejidad. Se ha podido estudiar satisfactoriamente, tratándolo de acuerdo a sus principales componentes, por lo que se ha decidido abordarlo de la siguiente forma:

- + factores físicos
 - las corrientes marinas
 - los vientos
 - el oleaje
 - las mareas

- la temperatura
 - el perfil de densidades
 - el transporte de sedimentos
- + factores químicos
- la salinidad
 - el potencial hidrógeno
 - el oxígeno disuelto
- + factores biológicos
- ecosistemas marinos
 - nutrimentos
- + factores geológicos
- suelo y subsuelo marino

El sitio por el que correrá el emisor submarino, que posea las condiciones óptimas para soportar y proteger su estructura, así como los puntos propuestos para disponer sanitariamente la descarga, serán elegidos finalmente de acuerdo a la combinación óptima de todos los componentes de dicho ambiente, sujetándose a los requerimientos de dilución tales que permitan la adecuada protección del medio marino, es decir, que la longitud del emisor y la profundidad del sistema difusor dependerán de dichos requerimientos.

2.1.1 Oceanografía física

El mar como ambiente físico presentará diferentes propiedades a las descargas de aguas residuales que se efectúen dentro de él, de modo que habrá algunos factores que favorezcan, ya sea de manera individual o combinada, la dilución y dispersión de las partículas descargadas, la velocidad de decaimiento de las mismas, la no sedimentación y la asimilación de algunos elementos al medio marino.

1. Corriente marina.

Las aguas del mar están en constante movimiento debido a causas tales como la diferencia de temperatura entre las aguas ecuatorial, tropical, templada y polar y a la variación de la presión atmosférica principalmente. Se clasifican las corrientes en dos tipos: las llamadas oceánicas, que tienen influencia a un macronivel, relacionadas estrechamente con la presión atmosférica y las corrientes costeras, cuya acción se debe predominantemente a la diferencia de temperatura y su efecto se observa a lo largo del litoral.

Son las corrientes costeras las que influyen en el diseño y construcción de un emisor submarino, ya que es en esta zona donde la dispersión de las aguas descargadas se lleva a cabo.

Un aspecto de suma importancia es el conocimiento de la dirección y velocidad de las corrientes marinas en las distintas épocas del año. De esta manera se puede elegir el sitio donde ubicar el difusor que descargará el efluente y conocer así la posible trayectoria de la pluma. Su velocidad será útil conocerla cuando se determina la velocidad de decaimiento de la pluma de aguas descargadas.

Para conocer ambas características se efectúa un programa de muestreo que indique las corrientes dominantes y sus variaciones, registrándose los períodos en los que se presentan cada una de ellas. Dicho programa conviene realizarlo por lo menos durante un año, sirviéndose además de los registros meteorológicos que de la zona en estudio haya realizado cualquier organismo o institución.

Para evaluar las corrientes existen los métodos directos y los indirectos. Por lo general, se utilizan los primeros porque son prácticos. Los indirectos se apoyan en ecuaciones deducidas de

estadísticas. Entre los directos se pueden mencionar:

- A) Métodos lagrangianos o de trayectoria, que consisten en registrar periódicamente la posición de cuerpos dejados a la deriva, tales como cruces de deriva, manchas de colorantes, botellas, material radiactivo o corrientómetros de paracaídas, pudiendo establecer su trayectoria y velocidad. Con estos métodos es posible determinar las características de las corrientes superficiales, subsuperficiales y de profundidad. Uno de los cuerpos utilizados en estos métodos se muestran en la figura 2.
- B) Métodos eulerianos o de flujo, son aquellos que utilizan instrumentos estacionarios a través de los cuales fluye el agua moviendo una hélice, cuantificándose las revoluciones en un lapso determinado. Para conocer la dirección cuentan con una paleta orientadora. Se utilizan para corrientes subsuperficiales y profundas.

El corrientómetro Ekman es un ejemplo de ello y se puede observar en la figura 3.

2. Oleaje

Se conoce por oleaje el conjunto de ondas que se producen en la superficie del agua por acciones tales como viento, gravedad, corrientes marinas, movimientos del fondo marino, etc.

Los elementos de una onda de oleaje se muestran en la figura 4.

Para clasificar las ondas se suele utilizar el período, ya que es característico e inalterable a lo largo de todo su desarrollo, además por ser muy fácil de determinar, pues basta medir el

FIGURA 2
CORRIENTOMETRO DE PARACAIDAS

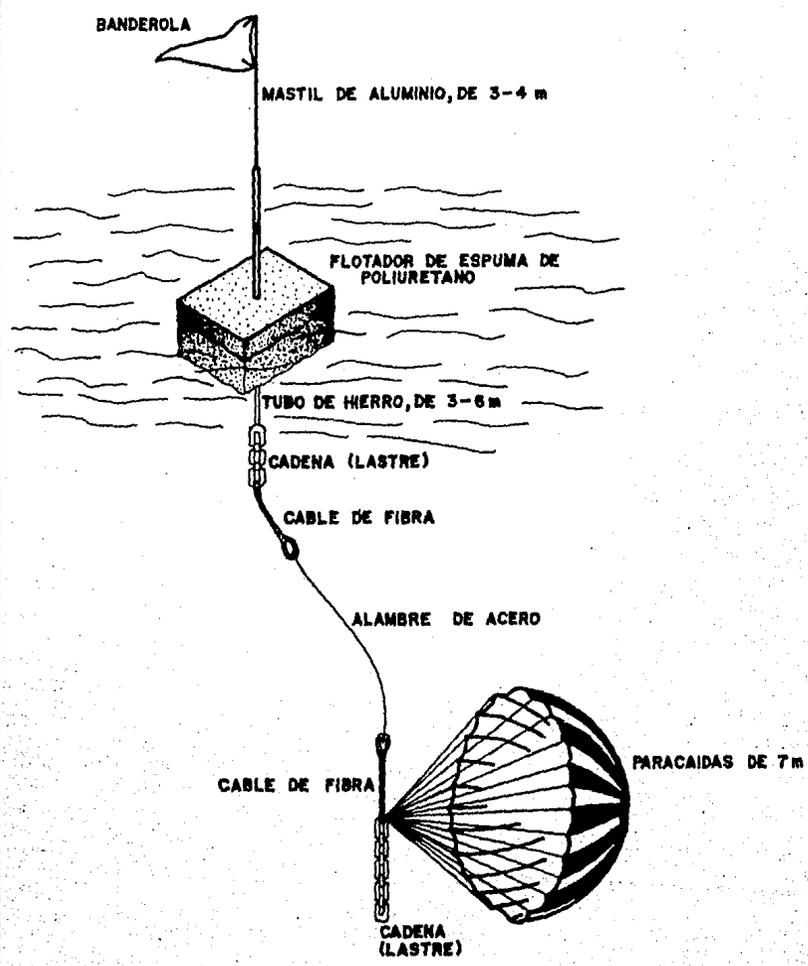


FIGURA 3
CORRIENTOMETRO DE EKMAN

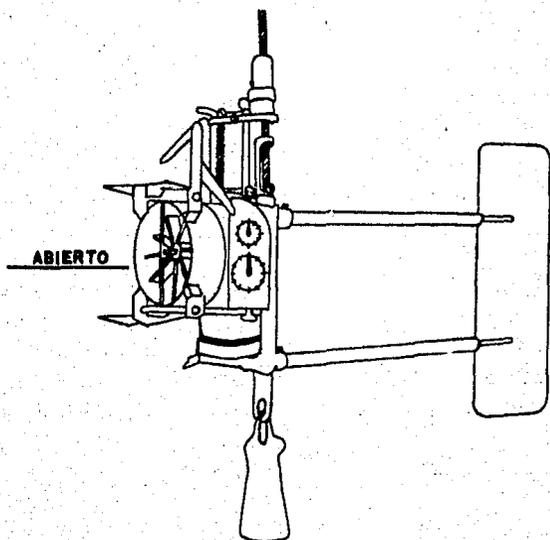
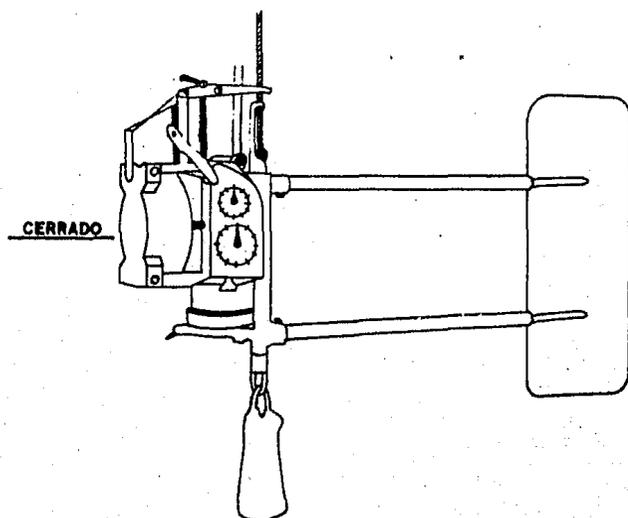
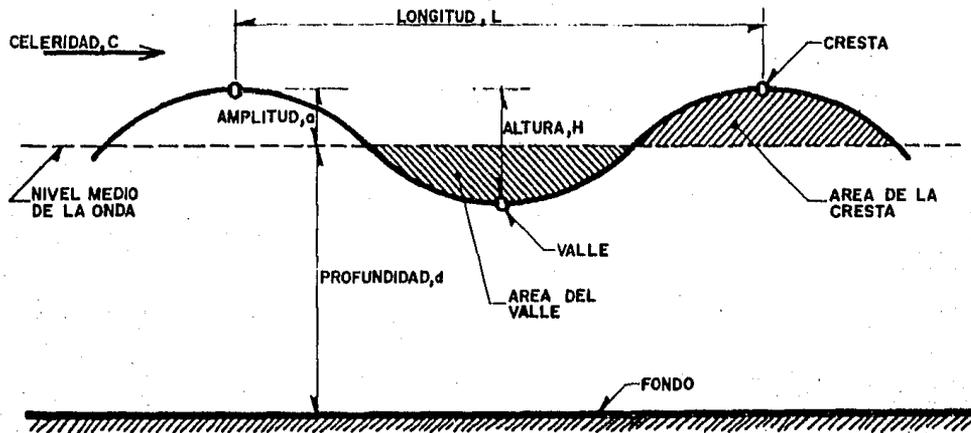


FIGURA 4 ELEMENTOS DE UNA OLA



tiempo en que dos crestas consecutivas pasan por el mismo lugar. De acuerdo a esta característica, Kinsman (1965) propuso la clasificación que se muestra en el cuadro 1.

La acción del oleaje se dejará sentir en la estructura del emisor siempre y cuando éste se encuentre a una profundidad menor o cuando más igual a la mitad de la longitud de las ondas, siendo necesario únicamente estudiar la zona con oleaje de estas características, es decir, las llamadas zonas de aguas intermedias y someras o bajas.

El oleaje que se presenta con la mayor frecuencia es el debido a la acción del viento, siendo la fuerza de gravedad la que amortigüe su efecto (consultar el cuadro No. 1). Para determinar sus características se pueden emplear varios métodos: fórmulas empíricas, métodos indirectos (espectro de energía, altura significante), cartas estadísticas y medición directa.

Los métodos que se apoyan en fórmulas empíricas son poco confiables para diseñar en base a ellas.

El método del espectro de energía es muy laborioso y dado que se utilizan algunas gráficas se pueden tener variaciones en resultados para un mismo caso.

El método de altura significante relaciona las acciones de viento y oleaje en aguas profundas. Propuesto por Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB), utiliza las siguientes expresiones:

$$\frac{gH}{U^2} = 0.283 \tanh 0.0125 \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.42}$$

$$2 \frac{gT}{U} = 1.2 \tanh 0.077 \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.25}$$

CUADRO No. 1

CLASIFICACION DE LAS ONDAS

| NOMBRE DE LA ONDA | PERIODO | FUERZA MAS IMPORTANTE QUE LA GENERA | FUERZA MAS IMPORTANTE QUE LA AMORTIGUA. |
|---|--------------|---|--|
| Capilar | 0 - 0.1s | Viento | Tensión superficial, gravedad |
| De ultragravedad | 0.1 - 1s | Viento | Gravedad, tensión su- perficial |
| De gravedad | 1 - 30s | Viento | Gravedad |
| De infragravedad | 30s - 5 min | Viento | Gravedad, Coriolis |
| De período largo in- cluidas ondas de ma- rea | 5 min - 24 h | Viento, tormenta, maremo- tos, atracción del sol y de la luna | Coriolis, gravedad |
| De transmarea | 24 h | Atracción del sol y de la luna | Coriolis |

Fuente: Referencia 17.

en donde:

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

U = velocidad del viento (m/s)

F = longitud del fetch (m)

H = altura de la ola (m)

T = período del oleaje (s)

Otro método más para la predicción del oleaje en alta mar es el de las cartas estadísticas y están formadas por las observaciones sistemáticas que hacen las embarcaciones mientras navegan en la zona de generación del oleaje.

Los métodos mencionados hasta aquí proporcionan la manera de predecir el oleaje en la zona de aguas profundas, que es donde se generan las olas, ya sea en condiciones normales o bajo la acción de huracanes. Algunos de estos métodos permiten extrapolar las características a la zona de decaimiento, que es donde se ubican los sitios de construcción de emisores (o sea, los litorales).

Sin embargo, el método con mas ventajas lo es sin duda el de mediciones directas y formar con los registros de las mismas, en base a una distribución estadística (Rayleigh, por ejemplo) una ley del comportamiento del oleaje en un sitio determinado. Para este método es indispensable contar con un registro de observaciones de por lo menos 12 meses, donde se contemplen las variaciones que tiene el mismo en las diferentes estaciones. Este método es caro, pues implica erogaciones en personal especialmente asignado a las observaciones.

Dichas observaciones se realizan utilizando una regleta instalada en el agua a una profundidad más grande que el nivel de mareas más bajo. Se procede entonces a la observación y anotación de altura y tiempo de 100 olas consecutivas. Esto para una estación y

así para las restantes. Se grafican los resultados como altura del agua contra tiempo. Se selecciona el tren de olas más importante.

Ambos métodos permiten predecir el oleaje en aguas profundas, es decir, en la zona de generación, siendo necesario extrapolar los resultados a la zona de decaimiento, en aguas intermedias y someras, donde las solicitaciones provocadas a la tubería por el oleaje son manifiestas.

Dentro de los fenómenos que modifican la dirección del oleaje en la zona litoral están la refracción, la reflexión y la difracción.

La refracción es un cambio de dirección debido a la influencia del fondo y ocurre cuando la profundidad es menor que la semilongitud de onda y las líneas isobatas no son paralelas a las crestas de las olas.

La reflexión es un reenvío de la ola por choque contra un obstáculo siendo el ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia.

La difracción se produce cuando la ola contornea la extremidad de un obstáculo y consiste en un cambio de dirección y velocidad de las ondas que penetran en una zona de aguas quietas, amortiguándose rápidamente.

Al conocer la batigrafía de la zona por la que cruzará la tubería del emisor, se debe considerar la posible presentación de uno o más de estos fenómenos, de manera que se considere su efecto en el diseño estructural, así como en el procedimiento constructivo del mismo.

Su influencia, más que en la descarga, se deja sentir en la

estructura y este efecto debe ser considerado en el diseño del emi sor, de tal forma que éste sea capaz de soportar las sollicitaciones producidas por el oleaje para que no sea afectado durante su operación. También es preciso tomar en cuenta el factor oleaje en su construcción, ya que el material de la tubería así como el procedimiento de tendido de la misma dependerán de las condiciones que imperen en la superficie del mar.

3. Vientos

Los vientos son el resultado de la diferencia de presiones y temperaturas en la atmósfera, y a su vez del viento dependen las co rrientes superficiales y el común de las olas de los océanos. Las consecuencias de la acción del viento sobre un emisor, entonces, no son directas, sino a través de ambas características.

Como ya se explicó en su oportunidad, las corrientes superfi ciales son un elemento importante en la dispersión de las aguas des cargadas que alcanzan la superficie del mar. La determinación preliminar de la rosa de los vientos para la zona litoral inmediata a la población que dispondrá sus aguas servidas, permitirá advertir la dirección y velocidad de los vientos dominantes a lo largo del año. De este modo se puede sugerir un primer punto de descarga para el emisor, sitio desde luego sujeto a la conveniencia de los demás estudios requeridos.

La cuantificación de la velocidad del viento se efectúa mediante anemómetros, lo mismo que su dirección. Esta última se expresa en grados respecto al polo geográfico y el magnético.

La apariencia de la superficie del mar es el mejor medio pa ra determinar la verdadera velocidad del viento y su dirección cuando no se dispone de anemómetros. Para ello se puede auxiliar de la escala de Beaufort, dada en el cuadro No. 2.

CUADRO No. 2

ESCALA DE BEAUFORT

| CODIGO | DESCRIPCION | VELOCIDAD NUDOS |
|--------|-----------------|--------------------|
| 0 | Calma | Menos de 1 |
| 1 | Aire ligero | 1-3 |
| 2 | Brisa suave | 4-6 |
| 3 | Brisa ligera | 7-10 |
| 4 | Brisa moderada | 11-16 |
| 5 | Brisa fresca | 17-21 |
| 6 | Brisa fuerte | 22-27 |
| 7 | Viento moderado | 28-33 |
| 8 | Viento fresco | 34-40 |
| 9 | Viento fuerte | 41-47 |
| 10 | Ventarrón | 48-55 |
| 11 | Tormenta | 56-63 |
| 12 | Huracán | 64-71 |
| 13 | Huracán | 72-80 |
| 14 | Huracán | 81-89 |
| 15 | Huracán | 90-99 |
| 16 | Huracán | 100-109 |
| 17 | Huracán | 110-118 |

Fuente: Referencia 8.

La dirección se observa de acuerdo con el sentido de las líneas de las olas o de las pequeñas rizaduras de la superficie del océano; estas líneas son perpendiculares a la dirección del viento; cuando éste es más fuerte que 6 en la escala de Beaufort se forman líneas de espuma también perpendiculares a la dirección del viento.

La influencia de los vientos en la formación de las corrientes superficiales es bien conocida. Basado en estudios realizados en aguas profundas, Ekman (Ref. 10) obtuvo la siguiente relación empírica:

$$V_o = \frac{KV}{\text{sen } \phi}$$

donde

V_o = velocidad de la corriente superficial (m/s)

V = velocidad del viento (m/s)

ϕ = latitud

K = constante cuyo valor es 0.013 (Ref. 7)

Para definir la dirección del vector V_o , éste se dirige 45° hacia la derecha de la dirección del viento en las latitudes septentrionales, en las que cae nuestro país.

La acción del viento a través del oleaje puede manifestarse durante el proceso de tendido de la tubería, limitando entonces la factibilidad de acción de determinado equipo, y obligando al empleo de un procedimiento constructivo que requiera mayor inversión de tiempo y recursos. Es conveniente tener presente la época de huracanes, que en nuestro país tienen un período de ocurrencia bien definido, y ajustar el programa de los trabajos de instalación de la tubería en los meses de calma.

4. Mareas

El fenómeno denominado "marea" consiste en el ascenso y descenso rítmico del nivel del mar que se presenta con un período próximo a las 12 ó 24 horas, junto con una corriente de análoga alterancia. La marea constituye la onda oceánica de mayor longitud (miles de kilómetros) y con altura entre 0 y 18 m (Ref. 9).

La marea es consecuencia de la diferencia que existe entre la atracción que se verifica en el centro de la tierra y en sus superficies, tanto del lado que mira a la luna principalmente o el sol, así como el lado opuesto.

Las alturas máximas del nivel de las aguas se llaman "pleamares" y las mínimas "bajamares" denominándose "nivel medio" al promedio de las de todas los pleamares y bajamares, y "amplitud" a la diferencia entre las alturas de la pleamar y la bajar. Entre dos pleamares y dos bajamares transcurren en general y aproximadamente 12 horas 24 minutos cuando la marea es "semidiurna", pero existiendo casos de marea "diurna" en los cuales ese tiempo es de unas 24 horas 48 minutos.

En determinadas circunstancias el fenómeno se verifica de modo que las pleamares y bajamares sucesivas difieren mucho en cuanto al nivel que alcanzan las aguas, calificándose entonces a la marea de "mixta".

Una vez cada quince días, al tiempo de aproximadamente el novilunio y el plenilunio, las pleamares y las bajamares son más señaladas, y unos siete días después, estando la luna en cuarto creciente o cuarto menguante, lo son menos que las otras que se observan durante un mes; por lo que se reconocen a las primeras como "vivas" o "de zizigias" y a las segundas como "muertas" o "de cuadratura".

La U.N.A.M., por medio de su Instituto de Geofísica publica periódicamente las "Tablas de predicción de mareas" (Ref. 34) para 20 puertos nacionales, proporcionando el pronóstico de la hora a la que ocurrirán las pleamares y las bajamares, así como la altura con relación al plano de referencia de cada estación mareográfica, especificadas en dicha publicación.

La importancia de conocer esta característica para el ingeniero que diseña un emisor estriba en que la altura de pleamar señalará la carga necesaria para provocar un flujo unidireccional por la tubería, desde el punto de arranque en la playa, hasta el sitio de la descarga mar adentro.

5. Temperatura.

La temperatura del mar presenta pocas variaciones debido a la circulación continua de los océanos y a su enorme capacidad calórica, a pesar de las enormes diferencias geográficas y estacionales. En las costas mexicanas el promedio de la variación anual puede llegar a casi 7° C, presentándose la máxima en agosto y la mínima en marzo.

La temperatura como factor físico interviene de manera determinante tanto en los procesos bioquímicos de los tejidos animales y vegetales, como en procesos fisicoquímicos del ambiente marino, tales como la viscosidad de líquidos y solubilidad de gases en éstos, así como la salinidad.

En los mares de la zona templada y tropical se presenta un gradiente térmico vertical que se aprecia cuando se estudia la distribución de la temperatura en una columna de agua. Se presenta una estratificación característica: la temperatura desciende lentamente en el estrato superior, cerca de la superficie hasta lle-

gar a un nivel en que se registra un descenso brusco en la temperatura. Esta discontinuidad se llama termoclina.

En determinados casos ésta se presenta de tal forma que la densidad del estrato superior es menor que la de las aguas descargadas, impidiendo que éstas lleguen a la superficie. Esto se tratará con mayor detalle en el tercer capítulo.

Para medir la temperatura en el mar existen diferentes tipos de termómetros, los llamados reversibles protegidos y no protegidos, que se muestran en la figura 5. Su inmersión deberá durar por lo menos 5 minutos.

6. Perfil de densidades

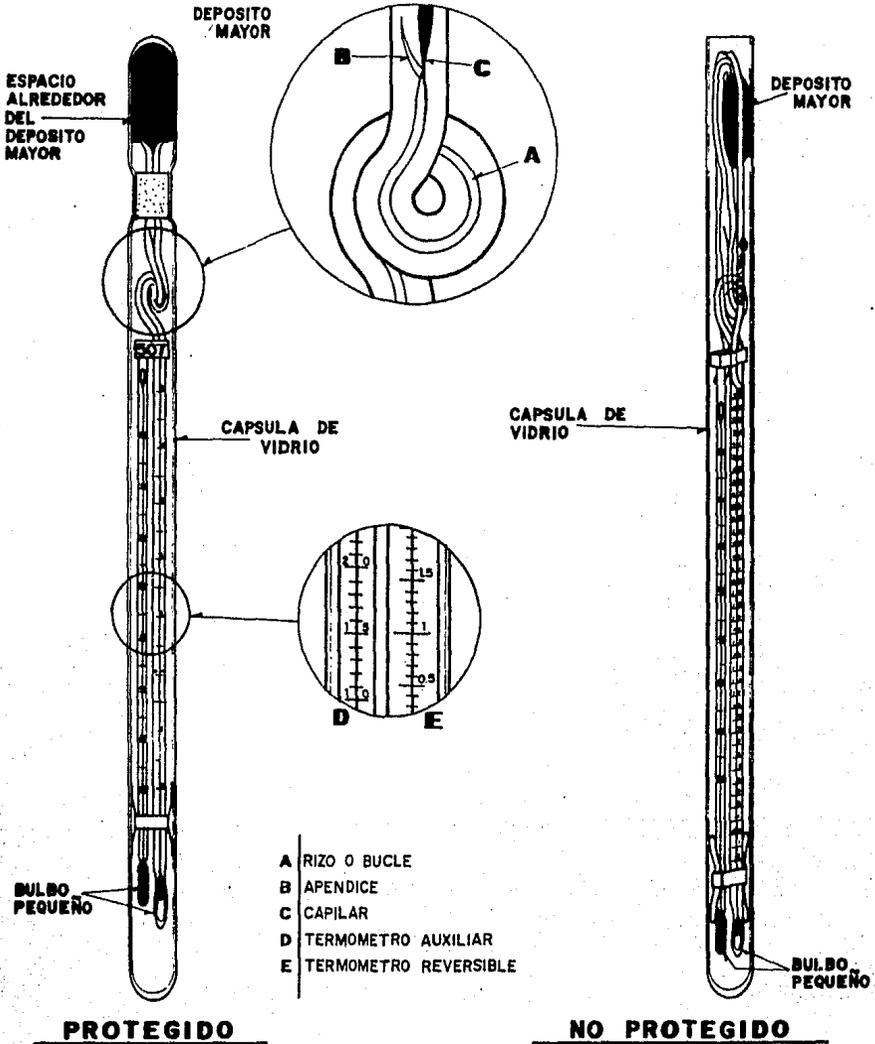
Una de las características fundamentales para proponer, en el diseño de un emisor, el sitio de descarga de las aguas residuales y lograr su adecuada dispersión, es la estructura de la densidad del sitio, que depende de tres factores: la temperatura, la salinidad y la profundidad.

La densidad se define como la masa de un elemento por unidad de volumen $\rho = g_m/cm^3$; en oceanografía se utiliza principalmente la gravedad específica que es una relación entre dos densidades y, por lo tanto, no tiene unidades (adimensional). Por definición, el agua destilada tiene una densidad igual a la unidad cuando está a 4°C (precisamente 3.97° C); la gravedad específica de una sustancia es ρ/ρ_m y tiene el mismo valor numérico que la densidad de la misma sustancia, pero sin unidades. La relación anterior indica la densidad de la sustancia sobre la densidad del agua pura a 4°C.

La densidad o gravedad específica del agua de mar es mayor, dependiendo de las sales disueltas que se encuentran en ella, en comparación con el agua pura. En la superficie del mar, la densi-

FIGURA 5

TERMOMETROS OCEANOGRAFICOS



dad promedio es de 1.025 g/cm^3 . En oceanografía se determina la densidad hasta la quinta cifra decimal. Una muestra de salinidad $S = 35\text{‰}$ y 20°C a la presión atmosférica, tiene una densidad igual a 1.02478 (Ref. 8).

La densidad del agua de mar siempre comienza con las cifras 1.0 ... por lo que es costumbre abreviar la densidad por medio de la ecuación siguiente:

$$\sigma_t = (\rho_t - 1) \cdot 1000$$

Un marcado gradiente de densidad que se presente a cierta profundidad inmediata a la superficie puede impedir que la mezcla agua residual-agua marina llegue a la superficie del mar. El mantener la descarga sumergida tiene una gran ventaja, pues se asegura el aspecto estético de las aguas receptoras.

En base a la temperatura y la salinidad, el Handbook of Oceanographic Tables proporciona las densidades específicas. En el cuadro No. 3 se pueden observar los valores de σ_t para una salinidad de 35.00 ‰ y las temperaturas más comunes para el agua de mar en nuestro país.

7. Transporte litoral de sedimentos.

En el diseño de un emisor, el transporte de sedimentos que ocurre a lo largo de la costa determina en muchas ocasiones el grado de estabilidad de la tubería. La ocurrencia de socavaciones en el piso sobre el que correrá dicha estructura puede llegar a provocar solicitaciones no previstas en el diseño, sobre todo entre la

CUADRO No. 3

DENSIDADES DEL AGUA DE MAR

| Salinidad 35% | Temperatura °C | Densidad ρ gr/cm ³ |
|---------------|-------------------|---------------------------------------|
| | 10 | 1.02698 |
| | 11 | 1.02679 |
| | 12 | 1.02662 |
| | 13 | 1.02642 |
| | 14 | 1.02622 |
| | 15 | 1.02600 |
| | 16 | 1.02578 |
| | 17 | 1.02554 |
| | 18 | 1.02530 |
| | 19 | 1.02504 |
| | 20 | 1.02478 |
| | 21 | 1.02452 |
| | 22 | 1.02424 |
| | 23 | 1.02397 |
| | 24 | 1.02367 |
| | 25 | 1.02337 |

línea de playa y la zona de rompiente del oleaje. Además, se puede alterar el funcionamiento adecuado del emisor en caso de que los sedimentos marinos obstruyeran alguna sección del difusor.

Murillo (Ref. 22) explica el estado de equilibrio dinámico del transporte de sedimentos a lo largo de la zona litoral, anotando que se entiende por tal un rango de variaciones que se desarrollan a lo largo de las estaciones del año. Por este motivo es imprescindible que se registre esta característica en un período al menos de 12 meses.

La cuantificación teórica puede efectuarse por distintos métodos, como el de Caldwell, el del Coastal Engineering Research Center (C.E.R.C.) y el de Larrás, entre otros.

En estos procedimientos se relaciona la energía del oleaje por unidad de longitud de playas con el volumen de arena que se mueve en un intervalo de tiempo y cuya expresión general es de la siguiente manera:

$$Q_s = K E^a$$

donde

$$E = \frac{\rho g H^2 L}{8}$$

- E = energía del oleaje
- ρ = densidad del agua de mar
- g = fuerza de gravedad
- H = altura de la ola de diseño
- L = longitud de la ola

Caldwell:

$$Q_s = 210 E^{0.8}$$

donde las unidades son $Q_s = (\text{yd}^3/\text{día})$

$$E = (10^6 \text{ lb-pie/día-pie playa})$$

Coastal Engineering Research Center (CERC):

$$Q_s = 0.014 H_o^2 C_o K_r^2 \text{ sen } \phi_b \text{ cos } \phi_b$$

H_o = altura de olas en aguas profundas

C_o = celeridad de la onda en aguas profundas

K_r = coeficiente de refracción

ϕ_b = ángulo que forman el oleaje al momento de romper y la playa.

Larrás añade las particularidades del material transportado:

$$Q_s = K g H_o^2 K_r^2 T \text{ sen } \frac{7}{4} \alpha$$

donde:

Q_s = volumen transportado por unidad de tiempo expresado en (m^3/s)

g = fuerza de gravedad, en (m/s^2)

H_o = altura de ola, en (m)

T = período del oleaje, en (s)

ϕ_b = ángulo que forma el oleaje con la playa

K = $1.18 \times 10^{-6} D^{-1/2} \frac{L_o}{H_o}$

D = D_{50} , en (mm)

L_o = longitud de ola, en (m)

El empleo de estos procedimientos teóricos para un mismo caso, por lo general lleva a discrepancias cuantiosas, dado que están fundamentadas en distintos factores que intervienen en el trans

porte litoral. Los métodos de campo más socorridos son los espigones y dragados de prueba, así como sustancias fosforescentes y radiactivas. La facilidad de realización de estos procedimientos prácticos les confiere una gran confiabilidad.

Una manera de obtener las consecuencias desfavorables derivadas de este fenómeno a un emisor es la de disponerlo en el fondo de tal modo que no interfiera, o lo haga despreciablemente, en la dinámica de los sedimentos, es decir, que éstos no encuentren obstáculo alguno en sus trayectorias establecidas.

Quien diseña un emisor deberá tener esto presente cuando elija el tipo de anclaje que sujetará la tubería al fondo, cuestión que más adelante se tratará.

2.1.2 Oceanografía química

El agua de los océanos es una solución de innumerable cantidad de elementos y compuestos químicos. Es la misma que hace posible la vida de las diferentes comunidades marinas, desde el microscópico plancton (productores primarios) hasta grandes especies nectónicas. Sin embargo, a diferencia de las propiedades físicas del agua de mar, las químicas son relativamente constantes, sin depender mucho de la profundidad, de la cercanía de la costa o de las características geográficas.

1. Salinidad

La salinidad, junto con la temperatura del agua, determinan la estratificación por densidades del mar, característica que permitirá prever si la descarga quedará sumergida o saldrá a flote.

Se define salinidad como la cantidad de gramos de sales disueltos en un kilogramo de agua de mar. Se representa con el signo ‰, leyéndose partes por mil.

Ecológicamente este factor señala, junto con la temperatura, la distribución de las especies oceánicas y litorales. La cantidad de sales disueltas en el agua de mar determina una presión osmótica sobre las paredes de las células de los seres que habitan en ella y cada especie animal o vegetal prospera en el medio líquido que tiene una presión osmótica a la cual está adaptada. Su hábitat estará limitado a aquella zona en que las variaciones diarias y estacionales de la salinidad puedan ser soportadas por dichas especies.

La determinación de este parámetro y las variaciones que pudieran presentarse respecto a la profundidad son útiles para establecer la estratificación únicamente. Es necesario hacer notar que la concentración de sales es de alrededor de 35 ‰ en todos los océanos, teniéndose valores que pueden considerarse invariables en la zona donde descargará un emisor. Las variaciones se dan a nivel de océanos, cuando nuestro interés se limita a zonas adyacentes a un punto litoral específico.

Para el análisis de la salinidad se pueden emplear el método de la titulación por nitrato de plata y los salinómetros que miden en base a la conductividad eléctrica del agua.

2. Potencial hidrógeno.

El agua de mar es normalmente básica, estando el valor de su pH entre 7.5 y 8.4 aproximadamente, con una media de 7.8 para todos los océanos.

La cuantificación del pH en forma preliminar a todas las demás pruebas, permitirá conocer las condiciones generales de un cuerpo de agua o de un flujo. Un cambio en la concentración media del ión hidrógeno puede indicar la presencia de contaminantes o la descomposición de sustancias orgánicas en el agua o también revela la actividad fotosintética en su superficie. Alteraciones hasta de 0.3

unidades en este parámetro se relacionan con cambios considerables en la solubilidad de algunos metales, como hierro, cobre, calcio y manganeso, así como en la concentración de bióxido de carbono, bicarbonatos y carbonatos entre otros.

Los procesos biológicos que se desarrollan en un cuerpo de agua y en magnitud se pueden identificar por el valor de su pH. El bióxido de carbono producido por la respiración de las especies acuáticas es suficiente para disminuir el valor del pH, mientras que el proceso fotosintético realizado por las plantas lo eleva.

La cuantificación de este parámetro se efectúa mediante métodos colorimétricos o con mucha mayor precisión, con potenciales eléctricos.

La importancia de dicha cuantificación estriba en que debe conservarse dentro del rango de variación ya mencionado cuando esté descargando el emisor, de manera que el efecto de las aguas residuales altere lo menos posible el nivel de pH en el entorno del difusor.

3. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el agua de mar, en su mayoría proviene de la atmósfera por absorción, debiéndose las alteraciones de su contenido a la temperatura principalmente, y en menor grado a la salinidad y el proceso de la fotosíntesis. Este último se efectúa sólo en la capa superficial, donde la luz se manifiesta con la intensidad necesaria para dicho proceso.

El oxígeno en el medio marino es producido sólo por organismos autótrofos, pero en cambio es requerido por todos los organismos vivientes para la realización normal del proceso respiratorio y por el proceso de oxidación de las sustancias derivadas de los

mismos, ya sea como producto de su metabolismo o como restos a su muerte.

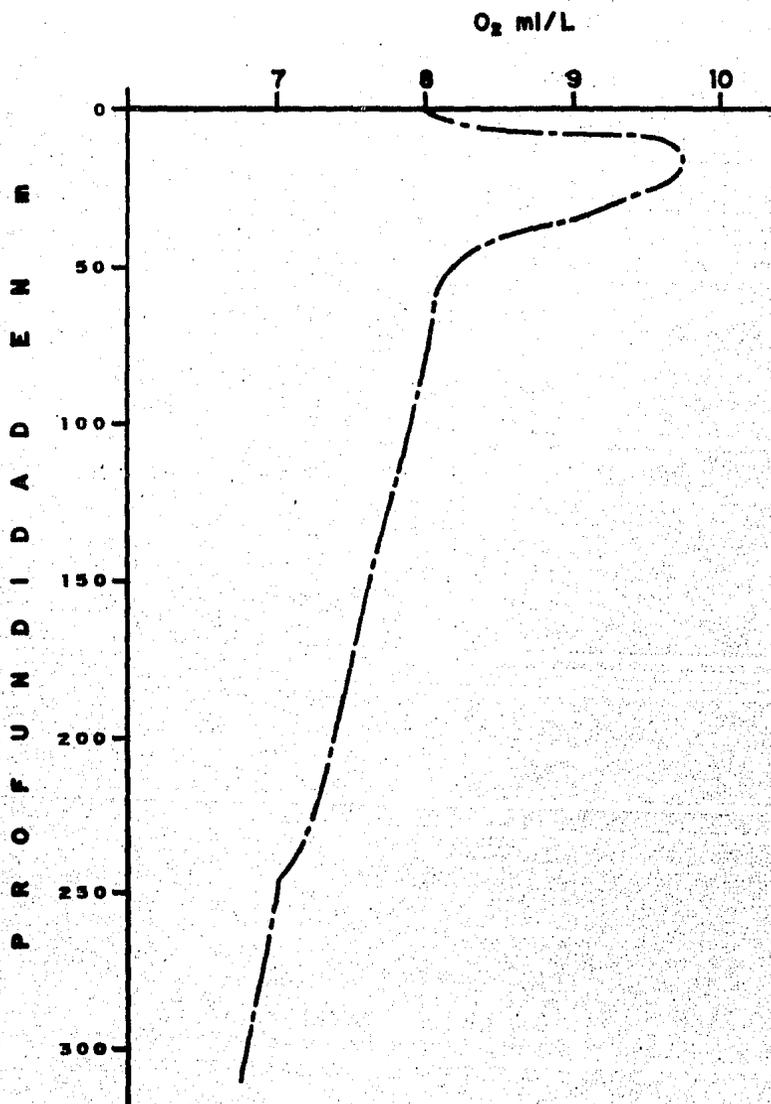
Además de las condiciones señaladas, existen ciertos procesos que afectan la distribución del oxígeno en el agua. Entre ellos, la diferencia que hay entre la presión parcial del oxígeno en el agua de mar y en el aire, lo que determina la dirección del intercambio gaseoso con la atmósfera. Cerca de la superficie puede existir un desequilibrio en las concentraciones de oxígeno debido a la actividad biológica o surgencias; estas deficiencias y excesos tienden a eliminarse por contacto de las capas en la interfase aire-agua y por mezcla vertical.

En la zona fótica se pueden encontrar concentraciones de oxígeno disuelto mayores al 100% debidas a condiciones especiales, esto entre los primeros 20-40 m por debajo de la superficie. Más abajo el ritmo de producción disminuye hasta llegar a una zona de equilibrio entre el oxígeno producido y el consumido, y se le llama nivel de compensación. (Ref. 31).

En la figura 6 se observa la variación típica de la concentración del oxígeno disuelto en los niveles superficiales, aunque se debe tener presente que la distribución y grosor de esta capa obedecerá a las condiciones particulares de clima, estación y zona geográfica de que se trate.

Es en este nivel superficial donde nos interesa definir el comportamiento del oxígeno disuelto, puesto que en este ámbito se formará la pluma de agua residual descargada por el emisor. La materia orgánica contenida en ésta consume parte del oxígeno presente durante su proceso de oxidación. Por esta razón es necesario también contar con el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas por disponer de manera que se cuente

FIGURA 6
DISTRIBUCION VERTICAL DEL OXIGENO
DISUELTO EN EL MAR



con los datos necesarios para evaluar las curvas de desoxigenación y reoxigenación de la mezcla agua residual - agua de mar.

El método de Winkler como procedimiento de titulación volumétrica sigue siendo el más confiable para medir la concentración de oxígeno disuelto en agua de mar. Existen equipos a base de electrodos, de precisión y delicados en su manejo, que permiten realizar in situ su cuantificación.

2.1.3 Oceanografía biológica

La vida en los océanos es abundante. Una inmensa variedad de plancton se encuentran a la deriva cerca de la superficie del mar; el fondo del océano es habitado por multitud de organismos invertebrados que se arrastran; especies con formas caprichosas habitan las oscuras profundidades marinas; y peces multivariados se desplazan a lo largo y ancho del medio.

El número total de especies animales en el planeta es cerca de 1 millón, estando en los océanos cerca de 160 000 de ellos, es decir, el 16% de todas las especies actuales de animales viven en el mar. Además, la cantidad y variedad de plantas marinas es vasta.

En general, el ambiente que habitan plantas y animales sufre cambios. Algunas veces estos cambios son temporales, como la turbidez del agua en los océanos. En ese caso, los organismos son capaces de afrontar dicha situación momentáneamente. En otro caso, los cambios ambientales pueden ser permanentes.

Cuando los cambios amenazan la supervivencia de los seres, se presentan una de las tres situaciones siguientes: los individuos emigran, se adaptan a las nuevas condiciones o perecen.

1. Ecosistemas marinos.

El océano como ambiente biológico se divide para su estudio en dos grandes regiones llamadas divisiones: la pelágica y la béntica, divididas a su vez en provincias, tal como se indica en la figura 7.

Para la clasificación biológica de los habitantes marinos, se agrupan estos en base al medio en que viven, utilizando para ello las divisiones béntica y pelágica. Así, los organismos que viven sobre el fondo marino se les conoce como bentos, mientras a los que viven en la zona pelágica se dividen en necton y plancton. El primero formado por los animales nadadores, mientras que el segundo es constituido por las plantas y animales pequeños que flotan y se mueven a la deriva conforme a las corrientes superficiales.

El estudio del plancton en el diseño de un emisor submarino interesa dado que se requiere ubicar sus trayectorias. El sitio elegido para la descarga, por lo tanto, dependerá de éstas. Así también, la curva de decaimiento de los microorganismos estará supeeditada a la acción del plancton. Para tomar muestras de plancton se utilizan las llamadas redes de plancton, que son conos largos de malla fina de seda o nylon, abiertos en ambos extremos, como se muestra en la figura 8. En el extremo inferior se coloca una botella especial para coleccionar la muestra. Se requiere arrastrar las redes a una velocidad determinada (1-15 nudos), así como mantener el campo de colecta arriba de los 15 m de profundidad.

Como se mencionó, el necton se caracteriza porque todos sus elementos tienen capacidad de autolocomoción. En su gran mayoría son miembros del phylum Cordados, que incluye peces, tortugas, rayas, tiburones y ballenas, entre otros. En las aguas litorales, donde la construcción y operación de un emisor llega a afectar de

FIGURA 7 CLASIFICACION DEL AMBIENTE MARINO

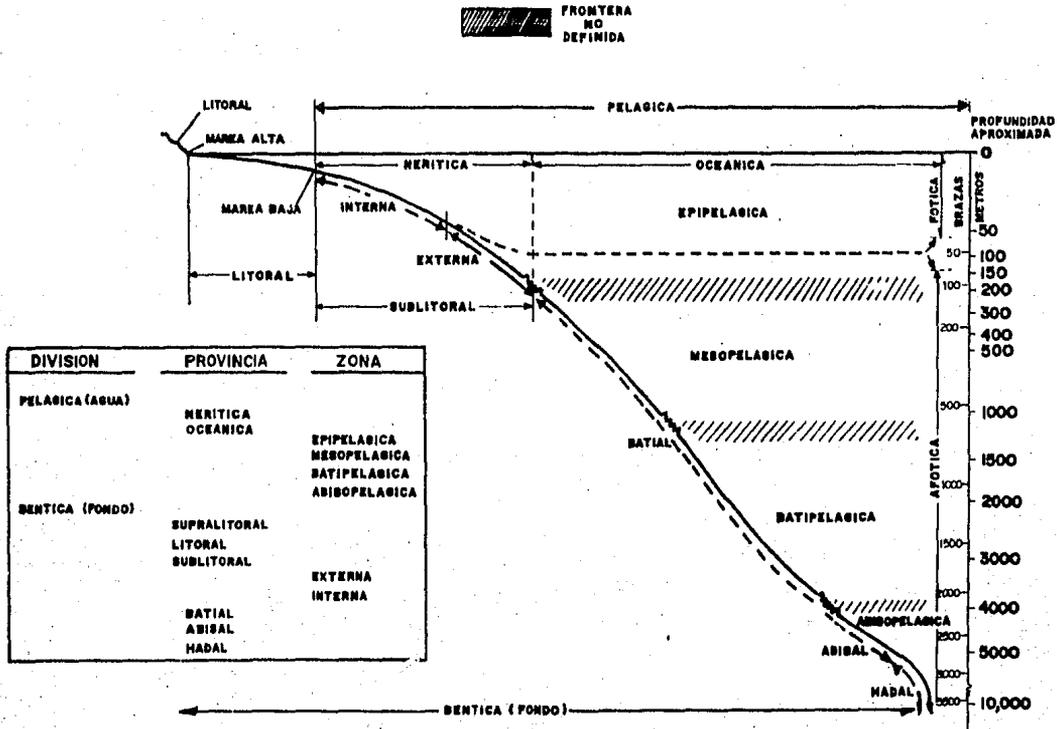
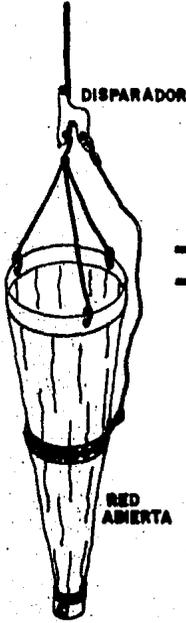
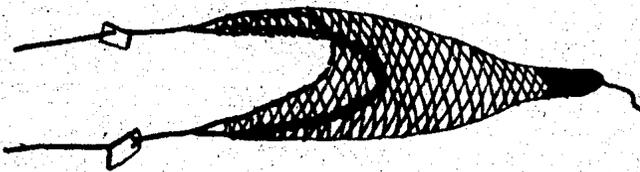
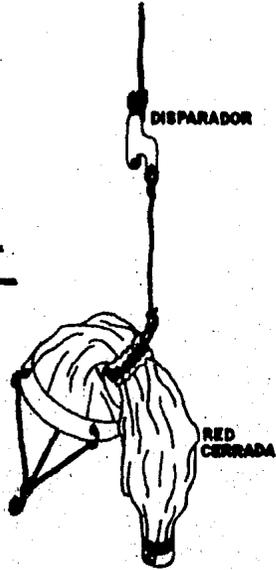


FIGURA 8

MUESTREADORES DE PLANCTON Y NECTON



MUESTREADOR
DE PLANCTON



MUESTREADOR
DE NECTON

algún modo el necton, son los peces de dimensiones pequeños y medianas los especímenes más comunes. Un programa de muestreo de necton pretende establecer las especies y sus rutas migratorias en el extremo marino bajo la influencia de un emisor y su descarga. Grace (Ref.13) establece un procesamiento de datos mediante el índice de diversidad de especies, en base a un análisis estadístico. Para el muestreo del necton, se utilizan redes como la mostrada en la figura 8, arrastrándose a velocidad y profundidad variables, de acuerdo a los especímenes que se pretenden coleccionar. Las muestras se conservan embalsamadas para su posterior estudio en laboratorio.

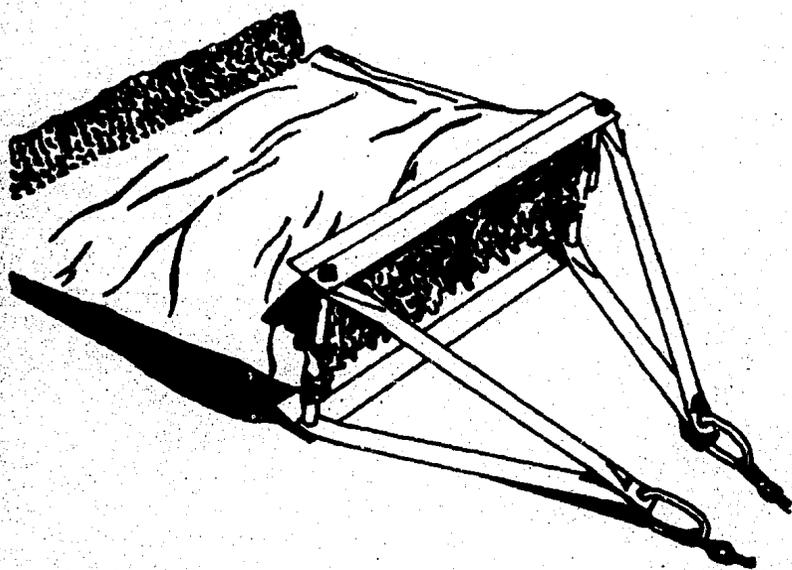
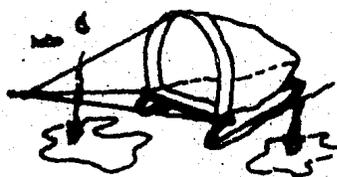
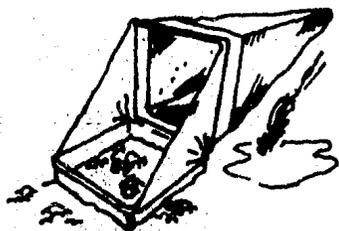
Los organismos bentónicos son los más expuestos a la acción directa de una descarga submarina, dada su incapacidad de locomoción. Si el agua se descarga con sólidos sedimentables o con exceso de nutrientes, el bentos será modificado. Su estudio pretende establecer los límites que puedan soportar, de manera que se consideren en los requerimientos de dilución. El análisis del bentos se efectúa sobre muestras coleccionadas mediante muestreadores como los de la figura 9.

Es indiscutible que una descarga de aguas residuales en la zona litoral afectará a la biota mientras aquella carezca de una disposición que favorezca el decaimiento de las condiciones agresivas provocadas por la descarga. Bachá (Ref. 3) especifica algunos valores de control recomendados para la zona de mezclado inicial en descargas por emisores, dados en el cuadro 4. En diluciones iniciales mayores de 100, por lo regular se cumplen dichas indicaciones, requiriéndose por lo tanto un diseño hidráulico que induzca tal efecto, cuestión que se tratará más adelante.

2. Nutrientes

El agua de mar es una solución acuosa compuesta de variados sólidos y gases. Algunos elementos se encuentran en abundancia y

FIGURA 9
MUESTREADORES DE BENTOS



CUADRO No. 4

VALORES DE CONTROL

| | |
|-------------------------|---|
| Oxígeno disuelto | 80% de la concentración normal |
| Temperatura | Cambio máximo debido a la mezcla: 1°C |
| pH | Cambio máximo debido a la mezcla: 0.5 unidades |
| Transmitancia de la luz | ≥ 25 m de prof. + decremento máximo 50% |
| | < 25 m de prof. + decremento del 20% |
| Coliformes totales | Balnearios 1000/100 ml NMP (media máxi ma) |
| | Zonas de captura de mariscos y moluscos 70/100 ml NMP (media máxima) |

otros son escasos. Los primeros se conocen como "constituyentes principales", mientras que los que se encuentran en pequeñas cantidades se denominan "constituyentes secundarios".

Algunos de los constituyentes secundarios reciben el nombre de nutrimentos, por el hecho de constituir sales que son utilizadas por las plantas marinas para su desarrollo. El estudio de los nutrimentos tiene gran importancia desde el punto de vista ecológico, ya que determina en forma directa la producción biótica de las diferentes áreas biológicas. En el caso particular de la zona donde descargará aguas residuales un emisor interesa conocer la variación que registrarán las sustancias nutritivas en dicha zona de influencia, por la aportación que de ellas hace el efluente.

Los elementos necesarios para el crecimiento de las plantas son doce, considerándose tres de ellos como limitantes de él para las plantas acuáticas: nitrógeno, fósforo y en ciertas condiciones el sílice.

De los compuestos que forman estos elementos, las sales como fosfatos, silicatos, nitratos y nitritos, además del amoníaco, sufren marcadas variaciones en su concentración debido a la actividad biológica. De ahí el cuidado por registrar escrupulosamente su abundancia relativa, disponibilidad, aprovechamiento, reintegración al medio, así como transformación, zonas de recuperación y variación geográfica y estacional.

El nitrógeno orgánico (nitratos, nitritos y amoníaco) puede ser determinado por el método de Kjeldhal, mientras los compuestos de fósforo (ortofosfatos, polifosfatos y fosfato orgánico) se cuantifican directamente con métodos colorimétricos.

2.1.4 Oceanografía geológica

La importancia del fondo marino como lugar sobre el cual se va a acomodar la tubería que forma el emisor, hacen que el conocimiento de las características, tanto de configuración topográfica como geología del sitio, sean necesarios para asegurar la estabilidad de la estructura.

1. Batimetría

Se conoce como batimetría a la configuración topográfica del fondo de un cuerpo de agua, tal como mares, lagos, lagunas, estuarios, presas, etc. Para el caso que nos ocupa, se entenderá por batimetría la del fondo marino y estuarino.

Como en toda obra civil, es imprescindible conocer la configuración del suelo que ha de soportar la estructura por diseñar, - que en este caso se compone de la tubería y de las sujeciones de ésta al fondo.

El estudio de la batimetría permitirá evaluar los diferentes trazos preliminares sobre los que se proyecte asentar la tubería. Los sitios preferentemente elegidos son los inmediatos a salientes de la costa, por estar las aguas de dichas zonas en mejores condiciones de circulación, llegando así la tubería al punto de descarga a través de la menor longitud de tendido submarino, procedimiento éste que encarece notablemente este tipo de obras. Sin embargo, es característico de estas zonas su batigrafía accidentada y por ende, con fuertes y cambiantes corrientes que dificultarán las maniobras de las embarcaciones que tenderían la tubería. Posiblemente la inversión necesaria para proporcionar estabilidad y seguridad al equipo de tendido iguale a los costos correspondientes a un trazo de tendido submarino más largo, pero con un mínimo de riesgos en su procedimiento constructivo.

Los equipos empleados para explorar (sondear) el fondo marino están constituidos por ecosondas y sonares de barrido lateral (scanner), los cuales permiten obtener la magnitud del tirante del agua y la batimetría. El funcionamiento de estos equipos se basa en el principio de la emisión de pulsos acústicos que al chocar con cualquier superficie se reflejan para ser recibidos en forma de eco por el transductor que los emitió.

Un programa de sondeo se inicia en gabinete delimitando la zona de interés. Dependiendo de los datos conocidos y de cuáles se desean conocer, se elegirán uno o varios de los tipos de sondeo:

- sondeo básico, que debe ser tan completo que no requiera complementarse con ningún otro levantamiento;
- sondeo de revisión, que permite una primera inspección del relieve; y
- sondeo especial, utilizado para zonas específicas, pequeñas, bien delimitadas.

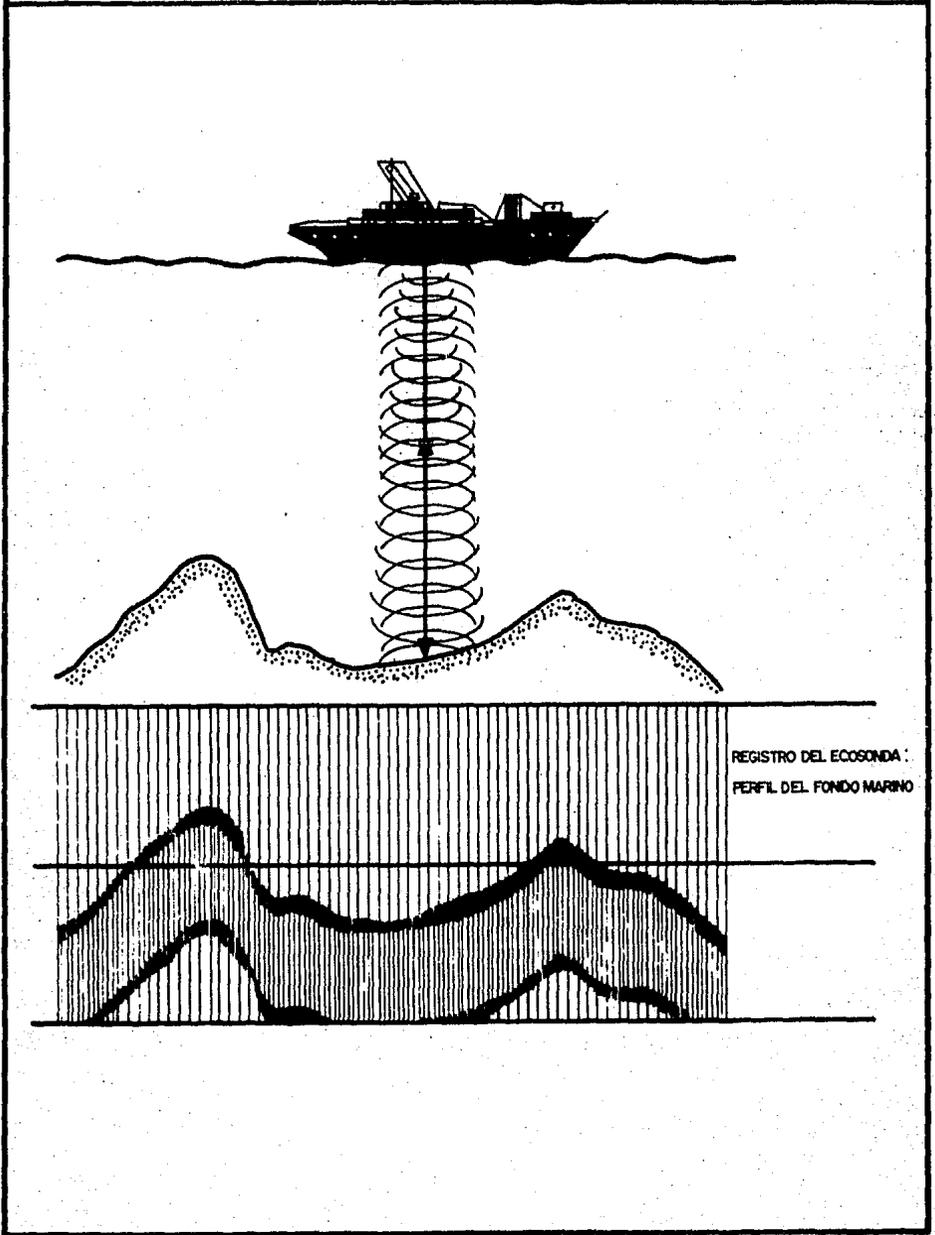
La diferencia entre ellos estriba en los detalles que se lo gran con los detalles de las cartas.

La línea tentativa sobre la que se desea tender el emisor tendrá siempre como punto convergente el sitio que bajo el mar reúna las condiciones para lograr una óptima difusión y dispersión de la descarga.

Los ecosondas registran en una gráfica el perfil del fondo marino mientras la embarcación está navegando. En esta forma se puede conocer en cualquier instante su profundidad. Una muestra del registro de un ecosonda se representa en la figura 10 .

En el caso en que no se posean ningún tipo de estudios bati

FIGURA 10
SONDEO ACUSTICO



métricos es recomendable realizar un sondeo de revisión, de modo que se tenga una primera aproximación del sitio por el que se proyecte pasar la tubería. Una vez hecha la primera definición de la línea de tendido, un sondeo especial proporcionará los detalles de otros accidentes batimétricos. Ambos tipos de sondeo se efectúan de preferencia únicamente sobre las líneas probables de tendido.

2. Suelo y subsuelo marino

La composición del suelo marino sobre el cual se colocará la tubería y su posible modificación por causas como deslizamientos propios, acciones sísmicas y fuerzas hidrodinámicas deberán ser conocidas por el diseñador de la tubería, de manera que pueda garantizar el buen funcionamiento del emisor a lo largo de su vida útil.

Para conocer la composición del suelo marino, se pueden muestrear los depósitos utilizando distintos instrumentos.

La draga tipo Petersen, que se puede observar en la figura número 11, se sumerge suspendida de un cable de acero hacia el fondo y cuando lo toca se cierra en forma violenta, tomando muestra de los sedimentos y, en ocasiones fragmentos rocosos o coralinos, dependiendo de la constitución.

El nucleador, instrumento que se representa en la figura número 12, recoge muestras hasta de 20 m de profundidad para así estudiar su diferente composición. Consiste en un tubo largo terminado en su extremo inferior en un diafragma que permite el paso de la muestra, pero no su salida. En la parte superior tiene un agujero que permite la salida del agua desplazada por la muestra del fondo, pero se cierra mediante un mecanismo cuando el nucleador es izado al barco, no permitiendo la entrada de agua al tubo donde está la muestra.

FIGURA 11
DRAGA TIPO PETERSEN

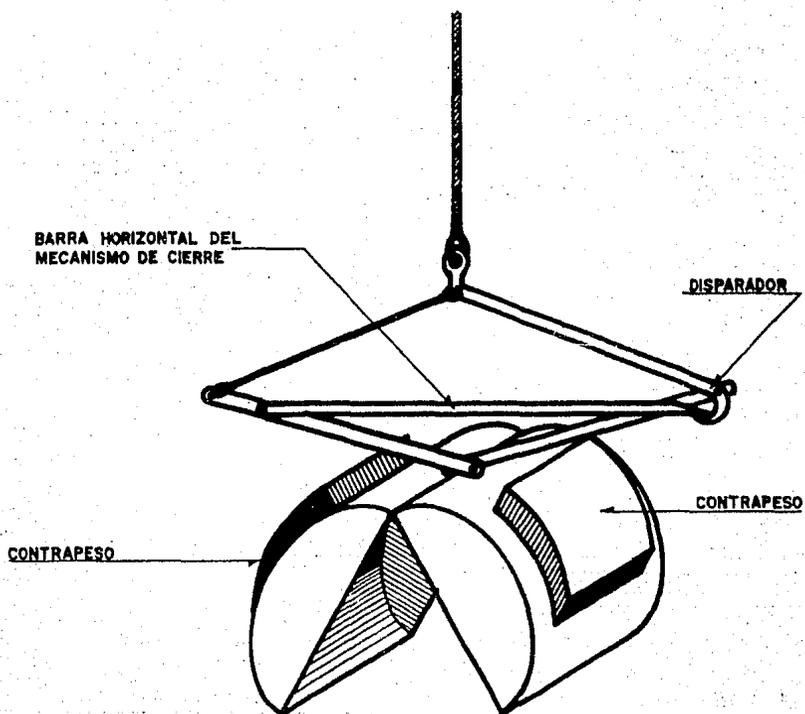
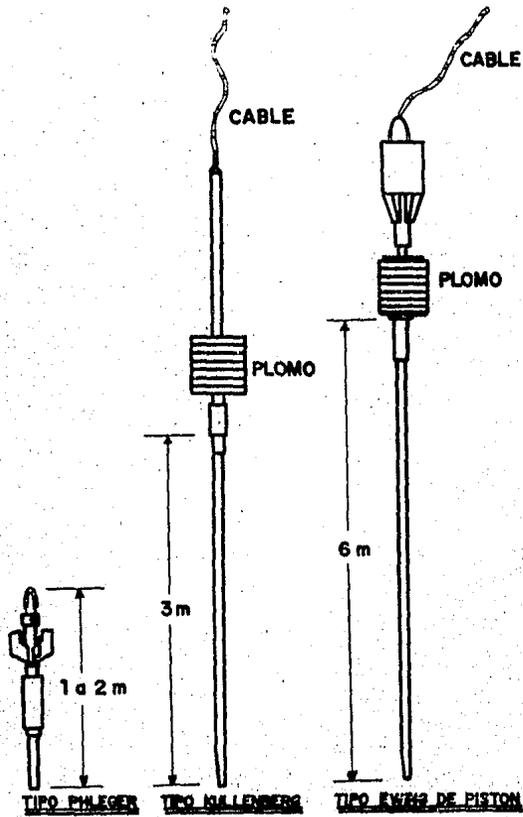


FIGURA 12 NUCLEADORES



Los snappers son muestreadores pequeños usados para obtener pequeñas cantidades de muestras de estratos superficiales del sedimento del fondo. Son muy útiles cuando se necesita obtener un gran número de pequeñas muestras rápidamente de una área determinada. Los más comunes son el clamshell snapper y el orange peel, que se pueden observar en la figura número 13.

El clamshell snapper está construido rígidamente de acero inoxidable. Las mandíbulas son cerradas por brazos pesados, accionados por un fuerte resorte y el peso principal. Hay un dispositivo que dispara las mandíbulas. Este dispositivo se extiende por debajo de las mandíbulas cuando están abiertas, de tal manera que pega en el fondo primero. El impacto mueve los brazos hacia arriba cerrando las mandíbulas, las cuales muerden con considerable fuerza y toman la muestra.

El orange peel funciona igual que el snapper anterior, sólo que tiene más de 2 mandíbulas. A éste se le utiliza para obtener muestras de fondo en aguas de baja profundidad.

El análisis de estas muestras, cualquiera que haya sido el método de obtención, incluye la determinación de tamaño, forma y porcentaje de partículas componentes, identificación de minerales y proporción de metales ligeros y pesados, densidad, humedad, pH, y contenido de carbonato de calcio.

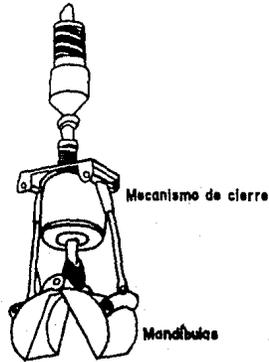
Respecto a la posibilidad de modificación del suelo marino y los consecuentes riesgos para la tubería colocada en él, se pueden mencionar entre otros, estos riesgos:

- deslizamiento de lodos por corrientes profundas
- licuación de arenas
- hundimiento por fallas profundas

FIGURA 13
MUESTREADORES DE FONDO MARINO

MUESTREADOR

TIPO
CLANSHELL

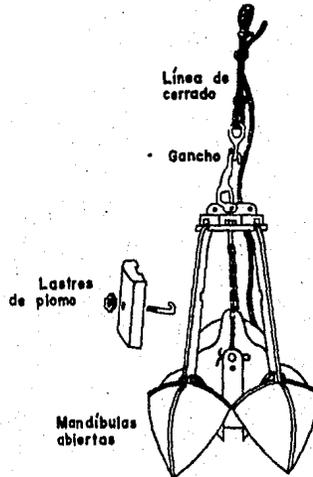


DRAGA CERRADA

MUESTREADOR

TIPO
ORANGE PEEL

DRAGA ABIERTA



La primera tarea en el diseño de líneas de tubería submarina es la determinación e identificación de estos riesgos. Los métodos disponibles para explorar el sitio con este propósito consisten en:

- exploración geológica para explicar los procesos geológicos de la zona;
- exploración geofísica utilizando sonar e instrumentos de espectro sísmico de alta resolución;
- exploración oceanográfica para determinación de vientos, olas y corrientes, tanto para las estaciones como para generación de tormentas, como ya se explicó en los respectivos puntos;
- exploración geotécnica, tal como perforación del suelo, para tomar muestras y probarlas en laboratorio.

Los dispositivos para investigar el subsuelo marino funcionan en forma similar a los ecosondas, que se basan en el principio de la emisión de pulsos acústicos de cierta frecuencia que al chocar con algún obstáculo se reflejan en forma de eco para ser recibidos por el transductor que los emitió. La diferencia estriba en que mientras las frecuencias de emisión son muy altas para los ecosondas, las que utilizan estos dispositivos son de frecuencia relativamente bajas y de mayor potencia.

Para exploraciones geotécnicas se realizan perforaciones del suelo, cuyo objetivo es el de tomar muestras y someterlas a pruebas en laboratorio. De este modo se puede conocer la historia geológica reciente, así como la capacidad de carga de la línea que soportará la estructura por tenderse. Dado lo costoso de las perforaciones submarinas se requiere un detenido estudio para determinar los puntos donde se deban efectuar.

En ocasiones la ocurrencia de eventos naturales o afloramientos pueden significar serios obstáculos para la construcción de obras marinas. Aunque no es el caso general para las costas de México, uno de los afloramientos más problemáticos en las plataformas continentales recientes es el escape de gas hacia la superficie, de origen biogenético o de depósitos de hidrocarburos (Ref. 33).

La importancia de los afloramientos de gas dentro de la ingeniería radica en que, en las zonas en que aflora, altera las propiedades mecánicas de los suelos; esto se debe a que, al mezclarse con los sedimentos, ocupa los vacíos del suelo, desplaza el agua intersticial y en ocasiones la presión del afloramiento hace fallar al suelo.

Un obstáculo más frecuente es la presencia de corales sobre el fondo marino. El origen del coral se debe a la presencia de colonias orgánicas de pólipos que se desarrollan generalmente en zonas rocosas y cuya acumulación da origen a diversas formas arrecifales (Ref. 33).

El problema más importante de los corales es que, aún cuando tuviese una buena capacidad de soporte, no son bien conocidas sus propiedades mecánicas y son un elemento frágil para construcción.

Además, la comunidad biótica que por lo general aloja, hace preferible buscar otra alternativa de menor riesgo. En este caso se tendrá que extender la tubería a lo largo de una longitud tal que ubique la descarga lo suficientemente alejada de dicho evento natural y disminuir el riesgo de una eventual depositación en los arrecifes.

2.2. Caracterización de las aguas residuales.

La necesidad de caracterizar las aguas residuales por disponer en el medio marino se justifica por el hecho de que la descarga deberá satisfacer las concentraciones permisibles que señale la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología para las condiciones particulares de - descarga, en cumplimiento con el Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas.

Las aguas servidas domésticas contienen concentraciones que sobrepasan los límites permitidos por dicha legislación para distintos parámetros. Al conocer los valores reales de éstos, será posible determinar las necesidades de tratamiento que requieran para su posterior disposición al mar.

Los parámetros que será indispensable conocer en las aguas residuales son aquellos que, de acuerdo al mencionado Reglamento, en su artículo 13, caracterizarán cualquier tipo de descarga:

- I.- Sólidos sedimentales
- II.- Grasas y aceites
- III.- Materia flotante
- IV.- Temperatura
- V.- Potencial hidrógeno (pH)

En el caso del uso de emisores submarinos para la disposición de dichas aguas, será necesario añadir aquellos parámetros que se fijan en las condiciones particulares de descarga, entre los que se contarán seguramente:

- 1.- Organismos coliformes
- 2.- Materia orgánica (DBO)
- 3.- Nitratos y fosfatos
- 4.- Sustancias tóxicas

El efecto provocado por la presencia de estos elementos en el ambiente marino se manifiesta como una alteración ecológica, además de degradarse sanitaria y estéticamente y su consecuente limitación en los posibles usos económicos, como pesca y turismo.

Abundando sobre dichos parámetros:

1. Organismos coliformes.

El tracto intestinal del hombre contiene innumerable cantidad de bacterias en forma de cápsulas llamados organismos coliformes. Cada persona evacua de 100 a 400 mil millones de coliformes por día además de otro tipo de bacterias. Los coliformes son inofensivos para el ser humano y, de hecho, son los depuradores que consumen la materia orgánica en las plantas de tratamiento.

Puesto que el número de organismos patógenos presentes en aguas de desecho es muy inferior y además difíciles de aislar, se utilizan los organismos coliformes, más numerosos y fáciles de cuantificar, como indicadores de la existencia de los primeros. De esta manera, un agua que esté libre de coliformes, indicará que no contiene organismos patógenos.

Una manera de obtener el número de organismos coliformes presentes en un volumen dado de agua es el número más probable (NMP). Esta técnica está basada en el análisis estadístico del número de resultados positivos y negativos de pruebas realizadas a múltiples muestras de igual volumen, de tal manera que constituyen series geométricas de presencia de coliformes. Una tabla completa de NMP de organismos coliformes para muestras la proporciona Metcalf and Eddy (Ref, 19) en su apéndice D.

Dependiendo de los usos de las aguas costeras, las concentraciones de organismos coliformes en muestras obtenidas en los sitios de interés para las susodichas actividades deberán estar dentro -

de los límites señalados en el Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas, que se puede consultar en el punto 2.2.4. En el diseño sanitario se contempla el decaimiento de los organismos patógenos en la última etapa de la dilución de las aguas residuales en el mar, cuestión que se tratará más adelante.

2. Materia orgánica.

Generalmente en las aguas residuales cerca del 75% de los sólidos suspendidos y 40% de los sólidos filtrables son material de origen orgánico.

Son producto de la actividad animal y vegetal, especialmente de la síntesis orgánica humana, siendo combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno generalmente, pudiéndose encontrar nitrógeno, azufre, fósforo y hierro en menores cantidades. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en las aguas residuales domésticas son las proteínas (40-60%), los carbohidratos (25-50%) y las grasas y aceites (10%). La urea, principal componente de la orina, también es otro compuesto orgánico manifiesto en las aguas residuales, siempre que éstas sean lo suficientemente frescas de manera que no permita su desdoblamiento a amoníaco.

Puesto que los microorganismos que consumen la materia orgánica requieran del oxígeno disuelto en el agua para su oxidación, la presencia de materia orgánica se mide en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Una forma de conocer este parámetro es mediante la cuantificación de la DBO₅, que consiste en el registro del oxígeno disuelto requerido durante los primeros 5 días por los microorganismos para realizar la oxidación bioquímica de la materia orgánica.

3. Nitratos y fosfatos.

El nitrógeno y el fósforo son elementos esenciales de los nutrimentos para el crecimiento del protista y de las plantas.

El nitrógeno presente en aguas residuales frescas forma parte de - las proteínas y de la urea. De la acción de los microorganismos sobre ellas resulta el amoníaco, que en un medio aerobio a la vez lo convierte en nitritos y nitratos. La existencia del nitrógeno en forma de nitratos en las aguas residuales indica que existe estabilidad entre los contaminantes y la demanda de oxígeno (Referencia 19). El nitrógeno orgánico se determina por el método de - Kjeldahl, aunque la concentración de nitratos también se obtiene por métodos colorimétricos.

El fósforo en forma de fosfatos presente en las aguas residuales también es resultado del metabolismo humano. Su determinación se logra utilizando un compuesto de amoníaco y molibdeno, siendo colorimétrico el método.

4. Sustancias tóxicas.

La presencia de sustancias tóxicas en las aguas residuales se debe indefectiblemente a actividades industriales y en ocasiones - agrícolas. El mercurio, cromo, cadmio, arsénico, selenio y plomo son tóxicos a ciertas concentraciones para cualquier forma de vida. Aún para plantas de tratamiento biológico se debe considerar su posible presencia, ya que también son tóxicos para los microorganismos.

Además, algunos metales pesados, como el manganeso y hierro, son necesarios para el desarrollo de distintas especies biológicas y cuya ausencia o insuficiente cantidad limitaría, por ejemplo, el crecimiento de las algas. Sin embargo, una cantidad excesiva de

cualquier metal pesado sería contraproducente, debido a su alta toxicidad.

La cuantificación de este parámetro puede realizarse por sofisticados procedimientos, siendo utilizados los espectroscopios de absorción atómica para metales pesados.

2.2.1. Programa de muestreo.

Un programa de muestreo permite obtener los valores característicos de las aguas residuales en estudio. En el caso que nos ocupa, las descargas podrán provenir de usos domésticos, industrial en algunos puertos y de origen pluvial en el caso que se tenga un sistema combinado. Para caracterizar con precisión el agua servida por disponer, será necesario efectuar un muestreo sistemático contemplado en un programa amplio.

En dicho programa, la obtención de buenos resultados depende de:

1. Asegurarse que la muestra tomada sea verdaderamente representativa de la descarga.
2. Usar la técnica adecuada para cada tipo de muestreo.
3. Preservar las muestras hasta que sean analizadas.

Las muestras deberán ser tomadas en las zonas donde se aprecie que están bien mezcladas las aguas residuales.

Para minimizar los errores analíticos y uniformizar las variaciones del gasto se deberán tomar muestras compuestas.

Muestras simples (un litro)

Las muestras simples son más confiables cuando:

1. El agua a muestrear no esté en movimiento continuo, como ocurre

en descargas intermitentes.

2. Las características son relativamente constantes.

Una muestra compuesta podrá dar como resultado un pH neutral mientras que una simple puede dar un valor alto o bajo de la escala. El valor de un pH puede variar hora con hora.

Las muestras simples son requeridas cuando se analizan los siguientes parámetros:

- . gases disueltos
- . cloro residual
- . sulfuros solubles
- . temperatura
- . pH

Muestras compuestas

Se toman 200 ml de cada muestra simple a cada hora, pudiéndose hacer también a cada 2, 4, 8, 16 ó 24 horas.

Una muestra compuesta es válida si es correctamente preservada hasta 8 horas después de haber sido tomada.

Los parámetros que se obtienen son:

- . DBO
- . DQO
- . TOL

La frecuencia para tomar muestras simples es de una cada hora. Si los resultados indican pocas variaciones se podrán tomar a intervalos de 2, 4, 8, 16 o 24 horas.

Las muestras bacteriológicas deberán ser tomadas en recipientes esterilizados con capacidad mínima de 300 ml, no llenarse totalmente y ser preservadas a una temperatura de 4°C.

Las mediciones que se requieren realizar en campo son las de:

- . pH
- . temperatura
- . oxígeno disuelto

El resto de los parámetros se analizan en laboratorio.

2.2.2. Cantidad de aguas residuales generadas

La comunidad que va a ser servida por un emisor produce una cantidad de agua residual que depende fundamentalmente del volumen que se le proporciona por el sistema de abastecimiento de agua potable. En ocasiones podrá variar por otras fuentes ocasionales o no censadas.

El gasto medio de aprovechamiento a una población debe cubrir la demanda de agua potable por habitante que señala el Manual de normas de proyecto para obras de aprovisionamiento de agua potable en localidades urbanas de la República Mexicana (SAHOP, 1979) y que se transcribe a continuación:

| POBLACION DE PROYECTO (habitantes) | TIPO DE CLIMA | | |
|---------------------------------------|---------------|-------------------------|------|
| | CALIDO | TEMPLADO (l/hab/día) | FRIO |
| De 2 500 a 15 000 | 150 | 125 | 100 |
| De 15 000 a 30 000 | 200 | 150 | 125 |
| De 30 000 a 70 000 | 250 | 200 | 175 |
| De 70 000 a 150 000 | 300 | 250 | 200 |
| De 150 000 a más | 350 | 300 | 250 |

Para cuantificar el gasto medio de abastecimiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_m = \frac{\text{dotación} \times \text{población}}{86\ 400}$$

La dotación se expresa en l/habitante-día, siendo las unidades del gasto Q_m (l/s).

Una vez establecido el gasto medio, se deben considerar las pérdidas inherentes a todo sistema de distribución de agua potable, que por lo general se estima como el 10 al 20% del volumen de dotación, dependiendo esto de las características y eficiencia de dicho sistema. Hecho esto se debe proceder a cuantificar el porcentaje de población que, teniendo dotación de agua potable, están conectadas sus descargas a la red de alcantarillado, puesto que la cobertura de ésta, salvo raras excepciones, siempre es menor que la red de aprovisionamiento.

Así mismo se debe considerar el tipo de alcantarillado que se tiene en la población que se estudie. Es probable que en algunas ciudades costeras se cuente con un alcantarillado pluvial separado del alcantarillado sanitario, dado que la descarga de aquél al mar inmediato no presenta ninguna consecuencia ecológica adversa. Cuando la infraestructura de saneamiento ya se tiene y es del tipo combinada, se debe tener presente el volumen de las precipitaciones para el cálculo hidráulico.

Para una cuantificación precisa de los gastos de aguas residuales vertidas al alcantarillado, en ocasiones es necesario hacer una medición directa en los sitios donde el gasto se ha establecido, es decir, en aquellos tramos en que el volumen que pasa por unidad de tiempo sufre variaciones despreciables. Estos puntos por lo gene

ral se proponen en alguna sección de los colectores principales.

Uno de los métodos de aforo más empleados en estos casos y con menores inconvenientes es el llamado sección-velocidad, que se basa en la ecuación de continuidad:

$$Q = VA$$

donde

Q = gasto que pasa a través de la sección

V = velocidad del flujo

A = área ocupada por el agua en la sección elegida

Puesto que un emisor submarino es una obra que se diseña para una vida útil determinada, se requiere cuantificar el volumen de aguas por desalojar a futuro. Para ello se estiman las predicciones de comportamiento de la población por cualquiera de los métodos que al respecto se han desarrollado; entre otros:

- progresión aritmética
- progresión geométrica
- tasa decreciente de crecimiento
- interés compuesto

A este cálculo se le denomina población de proyecto y representa el número de habitantes que serán servidos por el sistema que se ha de proyectar, para que satisfaga la demanda al término del período de diseño.

También es necesario hacer las adecuadas predicciones respecto a los coeficientes que consideran el porcentaje de población conectada a los sistemas de agua potable y alcantarillado.

2.2.3 Estimación de la calidad futura de aguas residuales.

Así como es necesario cuantificar el volumen futuro de aguas residuales generadas por una población, también se requiere hacer el pronóstico de su calidad, dado que el emisor por diseñar deberá ser capaz de abatir satisfactoriamente concentraciones superiores a las permitidas para diferentes parámetros.

El cálculo de dicho pronóstico debe considerar los planes de desarrollo para la zona donde se ha de proyectar el emisor. Serán de utilidad los planes de desarrollo urbano, industrial, turístico y pesquero. Basándose en ellos será posible predecir el tipo de descargas que se tendrán.

Así, para una comunidad costera que carezca de industrias, las características de sus aguas residuales serán similares a las actuales, a menos que llegue a albergar alguna industria, cualquiera que ésta sea. La Environmental Protection Agency de los Estados Unidos (Ref. 11) ha publicado los parámetros a considerar por tipo de industria.

La manera de calcular la carga contaminante por cada tipo de industria se basa en la cantidad aportada por unidad de producción industrial estipulada por la SEDUE (Ref. 30).

Se debe entonces realizar un balance de masas con las descargas domésticas para encontrar la carga contaminante a futuro.

2.2.4 Normas para la disposición de aguas residuales al mar.

Las normas de calidad deben correlacionar las que se apliquen a las aguas servidas con las exigidas en el cuerpo receptor en relación a su uso. Así será posible definir el grado de tratamiento a que deberá someterse el líquido por descargar.

Las normas que se empleen para la calidad del agua del cuerpo receptor deberán vincularse con la relación de gasto cuerpo receptor-descarga y con el uso a que estará destinado, considerando en éste aspectos sanitarios, estéticos, recreacionales y pesca, así como los aspectos económicos que pudieran derivarse de los cambios anotados. De esta manera, los costos estarán ligados al posible grado de tratamiento que las características del efluente demande, dependiendo de éstas últimas la longitud, profundidad y dificultades constructivas del emisor submarino.

El Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas (1973) señala en el artículo 70 lo que se entiende legalmente por términos como "aguas costeras", "capacidad de dilución", etc.

En la tabla 6 del mismo Reglamento se muestra la clasificación de las aguas costeras en función de sus usos y características de calidad, tabla que se transcribe en el cuadro 5, así como su anexo respectivo.

CUADRO No. 5

CLASIFICACION DE LAS AGUAS COSTERAS EN FUNCION DE USO
Y CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| CLASE | | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) |
|-------|--|---------------------|----------------------------|------------------|--|------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|------------------------|
| | | pH | TEMPERATURA (°C) | O.D. mg/l | BACTERIAS COLIFORMES NMP | GRASAS Y ACEITES | TRANSPA RENCIA | COLOR, OLOR Y SABOR | MÁTERIA FLOTANTE | SUBSTANCIAS TOXICAS |
| | | | | LIMITE MINIMO | ORGANISMOS/ 100 ml | | | | | |
| C1 | Cultivo de mariscos para consumo directo y áreas de acuicultura y todos los demás usos | CN ⁺ 0.3 | CN ⁺ 10% (b) | 90% de CN (c) | La concentración media deberá ser 70 (f) | (j) | (k) | (m) | Ausente | (n) |
| C2 | Recreación con contacto primario y todos los demás usos excepto C1 | CN ⁺ 0.3 | CN ⁺ 10% (b) | 90% de CN (d) | Menor que 1 000 (g) | (j) | (k) | (m) | Ausente | (n) |
| C3 | Usos recreativos sin contacto primario y todos los usos excepto los anteriores | CN ⁺ 0.4 | CN ⁺ 10% (b) | 90% de CN (d) | Menor que 2 000 (h) | (j) | (l) | (m) | Ausente | (n) |
| C4 | Explotación pesquera de especies de escama y todos los demás usos excepto los anteriores | CN ⁺ 0.4 | CN ⁺ 10% (b) | 90% de CN (e) | La concentración media mensual será 10 000 (i) | (j) | (l) | (m) | Ausente | (n) |

Dichas características deberán obtenerse de muestras que permitan representar el área afectada por las aguas residuales, fuera de la zona inicial de mezclado (a)

pH Potencial hidrógeno
O.D. Oxígeno disuelto
N.M.P. Número más probable

CN Condiciones normales
°C Grados centígrados
mg/l Miligramos por litro

ANEXO DEL CUADRO No. 5

- (a) Se considerará como zona de mezclado en aguas costeras al volumen ad yacente al sitio de descarga en el cual se mezclan las aguas residua les con las aguas costeras debido al momento de descarga y a la diferencia de densidades.
- (b) Nunca podrá exceder de 32°C.
- (c) Nunca deberá ser menor que 4.0 mg/l
- (d) Nunca deberá ser menor que 3.0 mg/l
- (e) Nunca deberá ser menor que 5.0 mg/l
- (f) No más del 10% del total de las muestras en un período mensual deberá exceder de 230/100 ml.
- (g) No más del 20% del total de las muestras-mes (5 muestras por lo menos) deberá exceder de 1 000/100 ml; ni ninguna muestra simple tomada durante un período verificativo de 48 h, debe exceder de 10 000/100 ml.
- (h) No más del 20% del total de las muestras deberá exceder el valor considerado en un período mensual. Ni en un período verificativo de 48 h, podrá exceder de 10 000/100 ml.
- (i) No más del 20% del total de las muestras deberá exceder de 10 000/100 ml en un período mensual, ni ninguna excedera de 20 000/100 ml.
- (j) Ningún aceite o producto de petróleo debe ser descargado en cantida

des que:

- I. Pueda ser detectado como una película visible, o
 - II. Pueda causar manchas en peces y/o organismos invertebrados, o
 - III. Forme depósitos de lodo aceitoso en la costa o en el fondo del cuerpo receptor, o
 - IV. Se vuelva tóxico.
- (k) La media mensual de este parámetro no podrá disminuirse en más de una desviación estándar de la media determinada en el mismo período para los niveles naturales.
- (l) La media mensual de este parámetro no podrá disminuirse más de una y media veces la desviación estándar, de la media determinada durante el mismo período para los niveles naturales.
- (m) No deberá descargarse ningún efluente con estas características a menos que se haya demostrado que no es perjudicial para el desarrollo de la vida acuática, la apariencia física o el uso óptimo del cuerpo receptor.
- (n) Se seguirá el siguiente criterio, para asignar de acuerdo con el cuadro número 6 las concentraciones máximas permisibles de las de cargas.

Se deberá determinar mediante bioensayos el límite medio de tolerancia, de 96 h (Tlm96). De preferencia se harán bioensayos con flujo continuo, utilizándose la etapa de vida más sensible de las especies de importancia ecológica o económica, con el siguiente factor de aplicación:

$$\frac{1}{20} \text{ para todas las sustancias tóxicas}$$

Cuando debido a la supervivencia de las especies no sea posible determinar el TLm_{96} , se deberá calcular mediante la expresión:

$$TLm_{96} = \frac{170}{\log(100-S)}$$

donde:

S = porcentaje de supervivencia para el 100% de desecho.

El cuadro No. 6 resume algunas de las sustancias tóxicas que de acuerdo con la información disponible se encuentran bajo reglamento y estudio en varias partes del mundo.

Los valores de las sustancias de este cuadro no son limitativos y están sujetos a modificación de acuerdo con el futuro avance tecnológico.

CUADRO No. 6

VALORES MAXIMOS PERMISIBLES DE SUBSTANCIAS TOXICAS EN AGUAS COSTERAS

| | | |
|--|-------------|------|
| Arsénico _____ | 0.1 como As | mg/l |
| Cadmio _____ | 0.001 | mg/l |
| Cobre _____ | 0.005 | mg/l |
| Cromo hexavalente _____ | 0.001 | mg/l |
| Mercurio _____ | 0.0005 | mg/l |
| Plomo _____ | 0.001 | mg/l |
| Fenoles _____ | 0.001 | mg/l |
| Substancias tóxicas al azul de metileno (detergentes) _____ | 0.001 | mg/l |

| | | |
|----------------|-------|------|
| Níquel _____ | 0.008 | mg/l |
| Zinc _____ | 0.01 | mg/l |
| Cianuro _____ | 0.001 | mg/l |
| Amoniaco _____ | 0.1 | mg/l |

PLAGUICIDAS

| | | |
|-----------------------------------|------|------|
| Aldrín _____ | 0.4 | µg/l |
| BHC _____ | 2.0 | µg/l |
| Clordano _____ | 2.0 | µg/l |
| Endrín _____ | 0.2 | µg/l |
| Heptacloro _____ | 0.2 | µg/l |
| Lindano _____ | 0.2 | µg/l |
| D.D.T. _____ | 0.6 | µg/l |
| Dieldrín _____ | 0.3 | µg/l |
| Endosulfán _____ | 0.2 | µg/l |
| Metoxiclor _____ | 4.0 | µg/l |
| Perthane _____ | 3.0 | µg/l |
| TDE _____ | 3.0 | µg/l |
| Toxafeno _____ | 3.0 | µg/l |
| Coumaphos _____ | 2.0 | µg/l |
| Dursban _____ | 3.0 | µg/l |
| Fenthion _____ | 0.03 | µg/l |
| Naled _____ | 3.0 | µg/l |
| Paration _____ | 1.0 | µg/l |
| Ronnel _____ | 5.0 | µg/l |
| Arsenicales _____ | 10 | µg/l |
| Naturales _____ | 10 | µg/l |
| Carbamatos _____ | 10 | µg/l |
| Derivados de 2,4-D _____ | 10 | µg/l |
| Derivados de 2,4,5-T _____ | 10 | µg/l |
| Compuestos de ácido ftálico _____ | 10 | µg/l |
| Derivados de traizina _____ | 10 | µg/l |
| Derivados de urea _____ | 10 | µg/l |

CAPITULO III

Difusión de aguas residuales en el mar.-

La disposición de aguas residuales en el mar mediante emisores submarinos depende enormemente de las características de su última sección para un óptimo resultado. Al final del emisor las aguas residuales son liberadas a través de un sistema de difusores, que consiste en una sección de la misma tubería que por lo general reduce su diámetro, contando con múltiples perforaciones en sus paredes y con su abertura terminal sellada, o bien, con una última perforación. Gracias a diversas investigaciones y experiencias prácticas (Ref. 13), se ha podido establecer la efectividad del empleo de un sistema de difusores.

Al momento de su vertido, el agua residual inicia su mezclado con el agua de mar adyacente y la mezcla, que es llamada "campo de aguas residuales", asciende a la superficie y se desplaza conforme a las corrientes -

prevalecientes en el océano.

Si el agua se descarga por los orificios del múltiple a gran velocidad y el medio receptor posee una densidad marcada, entonces será diluida por efectos de chorro turbulento. La dilución es la relación del volumen total de la mezcla aguas residuales-agua de mar al volumen inicial de aguas residuales (Ref. 3). El gradiente de velocidad entre la frontera de la pluma y el agua circundante provoca una turbulencia y consecuentemente - una acción de mezclado en el trayecto de ascenso de la pluma.

Si el agua de mar tiene una gravedad específica menor que la de la mezcla en dilución, el cono se combará hacia arriba y eventualmente podría alcanzar la superficie. Si, en cambio, el océano se encuentra estratificado verticalmente con una capa de agua tibia sobre agua fría, es posible diluir el agua residual suficientemente con el agua fría de tal manera que la mezcla obtenida tenga mayor gravedad específica que la capa superior - de agua tibia. En tal caso, la pluma de agua residual en dilución permanecerá bajo la capa superior. Ambos fenómenos se pueden observar en la - figura 14.

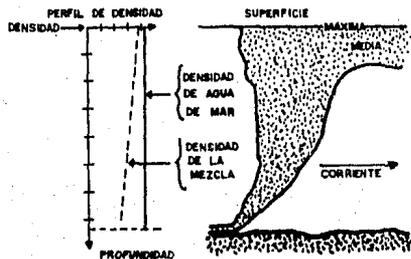
La estratificación superficial del mar se observa más a menudo durante - los meses del verano y otoño.

El proceso de vertido de aguas residuales al medio marino se ha dividido convencionalmente en tres etapas: dilución inicial, dilución por transporte y decaimiento. De éstas, la de mayor contribución en la disminución - de las concentraciones de contaminantes es la primera (Ref. 25).

Al descargarse por los difusores, la energía inicial de los chorros efluentes, a saber potencial, en virtud de la diferencia de densidades, y cinética, por la velocidad misma de estos, es disipada en un mezclado turbulento. Entonces el flujo de aguas descargadas se ha diluido, conociéndose se esta etapa como dilución inicial.

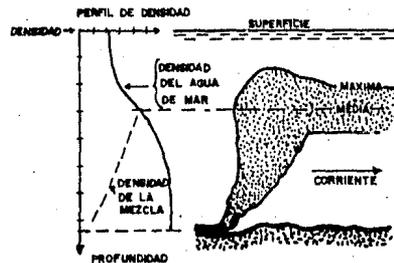
FIGURA 14 DESARROLLO DE LA PLUMA EN EL MEDIO MARINO

PLUMA SUPERFICIAL



NO ESTRATIFICADO

PLUMA SUMERGIDA



ESTRATIFICADO

En la etapa de dilución por transporte, el régimen de mezclado se mantiene en turbulencia debido al patrón de flujo oceánico (Ref. 3).

Finalmente, durante el proceso de decaimiento, la agresividad del medio representa el principal factor artífice de la baja en la concentración de microorganismos patógenos.

3.1 Dilución inicial.

Rawn, Bowerman y Brooks (Ref. 26) han desarrollado curvas de datos obtenidos en el campo para determinar la dilución inicial D_1 en un chorro de agua residual emitida por un orificio horizontal en un medio no estratificado. Abraham (Ref. 1) amplió estas curvas para mostrar que la dilución es una función de la profundidad y_0 del punto de descarga, del diámetro del orificio de descarga D y del número de Froude, para el sistema líquido-líquido, como se muestra en la figura 15.

El número de Froude se define como:

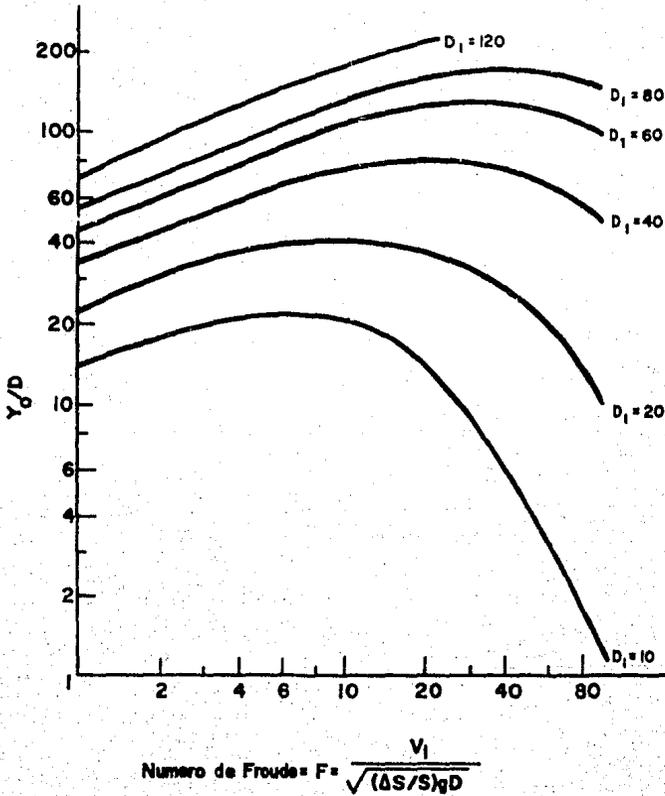
$$F = \frac{V_j}{\sqrt{(\Delta s/s)g D}}$$

en donde:

- V_j = velocidad del flujo.
- Δs = diferencia en gravedad entre las aguas residuales y el agua de mar adyacente.
- s = gravedad específica del agua residual.
- g = aceleración de la gravedad.
- D = diámetro de descarga del flujo.

La gravedad específica del agua del mar normalmente varía entre 1.010 y 1.030, mientras que para las aguas residuales está entre -

FIGURA 15
DILUCION INICIAL



0.99 y 1.00

Cuando se encuentran corrientes moderadamente fuertes, la dilución inicial puede estimarse mediante la ecuación:

$$D_1 = \frac{Vx b d}{Q}$$

en donde:

Vx = velocidad de la corriente.

b = longitud efectiva del sistema de difusión.

d = profundidad promedio del campo de aguas residuales.

Q = gasto de las aguas residuales.

Para un medio estratificado, los mismos Rawn, Browerman y Brooks han propuesto un posible análisis del problema. Si

$$\frac{(S - 1) \rho_F + \rho_d}{S} > \rho_C$$

entonces la pluma ascendente permanecerá sumergida (Ref. 3)

donde:

S = dilución mínima en la parte superior de la columna.

ρ_F = densidad de la capa fría.

ρ_C = densidad de la capa caliente.

ρ_d = densidad de las aguas residuales.

Además, Storrs y Feuerstein (Ref. 3) observaron que a medida que se dispersa el chorro de aguas residuales en agua salada, se incrementa la densidad del campo mezclado hasta que la energía potencial del mismo es insuficiente para que el efecto de flotación provoque ascensión adicional.

Aquí es posible evaluar la importancia de los estudios de campo, ya que la delimitación de una zona estratificada en su densidad permitirá considerar factible la elección de ésta como sitio de descarga.

Una excelente ayuda para el diseño de emisores será la utilización de modelos que representen las condiciones de estratificación del medio y la distribución de velocidades en la vertical, perfeccionando así los modelos matemáticos actuales, ya comentados, que se pensaron para condiciones tranquilas. Esto significa que los diseños actuales, al no considerar en sus cálculos las condiciones reales del mar, se conciben sobrados en cuanto a capacidad de dilución.

3.2 Dilución por transporte.

Una vez que la dilución inicial ha formado una mezcla bastante uniforme de aguas residuales y agua de mar sobre el difusor, el campo de agua mezclada empieza entonces a moverse de acuerdo con las corrientes existentes. Conforme se desplaza, las orillas exteriores del campo penetran al agua de mar como resultado de la mezcla turbulenta y adquiere la forma de plumas, como se muestra en la figura 14.

Se han desarrollado distintas ecuaciones para predecir el descenso en la concentración de contaminantes a lo largo de la línea central de la pluma (ver figura 18). Recientemente Foxworthy et al. (Ref. 3) lo ha hecho empleando la estadística. Sin embargo, el método comúnmente utilizado en la práctica sigue siendo el modelo de Brooks, basado en las leyes de difusión propuestas por Fick y cuyo análisis matemático trata Bachá (Ref. 3). El resultado de su análisis, para el caso en el que E es una función de la longitud del difusor elevada a la potencia 4/3, es

$$D_2 = \frac{C_0}{C_t}$$

$$D_2 = \frac{1}{\text{erf} \sqrt{\frac{3/2}{\{1 + 2/3 \beta (x/b)\}^3 - 1}}}$$

D_2 = dilución debida a la difusión turbulenta después de la dilución inicial.

C_t = concentración máxima del contaminante en el tiempo t .

C_0 = concentración del contaminante después de la dilución inicial.

$\text{erf}(x)$ = función de error (x).

β = $12 E/Vx$ b

E = coeficiente de difusión turbulenta = $0.001 (b)^{4/3}$ (pies/s) de la (Ref. 24).

Vx = velocidad de la corriente, en pies/s.

x = distancia a lo largo de la línea del centro de la pluma.

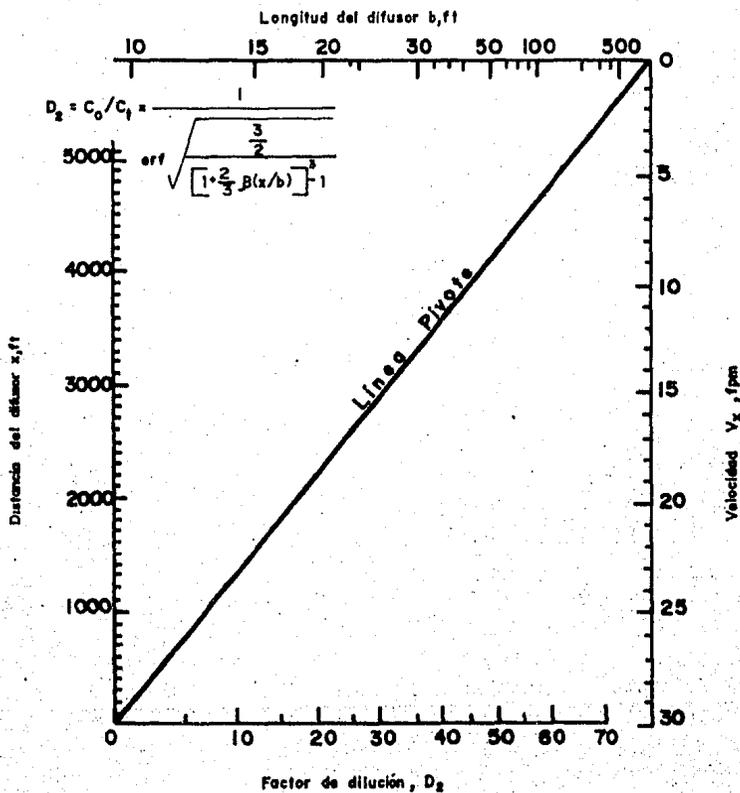
b = longitud efectiva del sistema difusor.

Se presenta un nomograma para la solución de esta ecuación en la figura 16.

El cálculo de la dispersión permitirá establecer la longitud óptima a la que se ha de introducir el emisor al mar, en función, como ya se vió, de las condiciones de circulación de corrientes, manifestándose ahora la importancia de los estudios de campo. Un programa adecuado de registro de corrientes será fundamental para elegir el punto hasta donde deberá tenderse la tubería, debiéndose cumplir condiciones óptimas para la dispersión de la pluma y, simultáneamente, requerir el tramo más corto posible de tendido submarino.

FIGURA 16

DILUCION POR TRANSPORTE



3.3 Dilución por decaimiento

El tercer factor de importancia en la dilución de las aguas residuales en el mar es lo que se llama tasa de decaimiento de las mismas. Dicho decaimiento se refiere al de los microorganismos patógenos - que portan, de manera que éstos dejen de representar un peligro para la salud.

Diferentes estudios (Ref. 10) han demostrado que esta disminución - se debe a causas tan diversas tales como los procesos propios de una planta de tratamiento: sedimentación, coagulación y floculación, - así como a muerte propia de los microorganismos y su rozamiento dentro del flujo.

La mortandad de microorganismos obedece a la Ley de Chick:

$$C_t = C_0 e^{-Kt} = C_0 10^{-kt}$$

donde:

C_t = concentración de microorganismos en el tiempo t .

C_0 = concentración de microorganismos después de la dilución inicial.

K, k = constantes de decaimiento de microorganismos.

t = tiempo

Para medir el comportamiento de este proceso, se utiliza el parámetro t_{90} , que indica el tiempo en el cual el 90% de los microorganismos mueren. Se ha demostrado (Ref. 14) que dicha disminución puede obtenerse usualmente en un período de 2 a 6 horas.

Si la constante de decaimiento es cambiada a la forma equivalente -

t_{90} , es decir

$$\frac{C_t}{C_0} = 10^{-Kt}$$

y si al t_{90} se cumple que $C_t = 0.10 C_0$

entonces $0.10 = 10^{-Kt}$

en donde resulta $t_{90} = \frac{1}{K}$

entonces la dilución debida al decaimiento del desecho puede formularse como

$$D_3 = \frac{C_0}{C_t} = \exp \frac{2.3 \times}{t_{90} 60 Vx}$$

Un nomograma para la solución de esta ecuación se presenta en la figura 17.

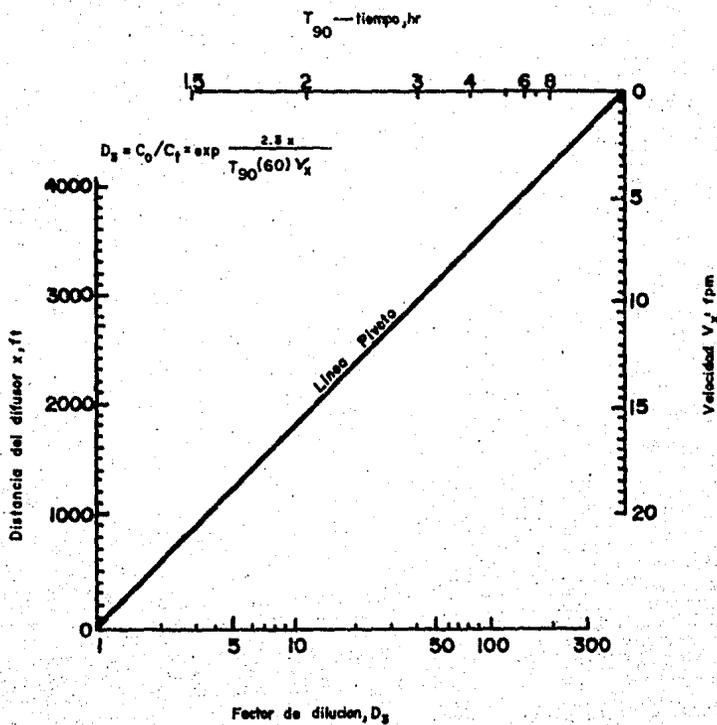
3.4. Análisis sanitario de requerimientos de dilución.

El objetivo del empleo de un emisor submarino como alternativa en la disposición de las aguas residuales es, fundamentalmente, mezclar el efluente en un vasto volumen de agua marina. Con esto se lograrán las condiciones necesarias para que los microorganismos patógenos del efluente decaigan favorablemente.

Un análisis del fenómeno de difusión, así como del decaimiento de los microorganismos permitirá establecer las características óptimas para efectuar este proceso en forma adecuada. Así, será posible conocer la longitud mar adentro de la tubería, el arreglo de los difusores (longitud y orientación) y el número aproximado y la separación entre los orificios. Dichas particularidades contribuirán, junto con las del efluente y del cuerpo receptor, a lograr las concentraciones adecuadas para considerar ya sin riesgo el contenido de mi

FIGURA 17

DILUCION POR DECAIMIENTO



croorganismos patógenos.

Brooks (Ref. 5) divide el proceso de difusión en tres etapas:

1. Chorro de mezclado inicial (considerando la potencia del chorro, las corrientes marinas y la diferencia de densidad).
2. Campo homogéneo de mezcla agua de mar-agua residual.
3. Campo de difusión turbulenta, debida ésta a la turbulencia oceánica natural.

Matemáticamente las etapas 1 y 3 han sido analizadas por diferentes investigadores y se ha considerado a la segunda como de transición. Se explicará con más detalle lo que ocurre en la primera, dado que su contribución al proceso de dilución de la descarga es preponderante sobre los otros acontecimientos.

3.4.1 Análisis de la dilución provocada por un chorro descargado - en un medio acuático sin estratificación.

La dilución S_0 en el punto ubicado en la superficie sobre el eje de una pluma formada por la descarga de un chorro horizontal, - como la muestra la figura 18, es función de las variables que a continuación se enumeran, haciendo la consideración de que el gradiente de temperatura en el agua y las corrientes masivas son despreciables:

y_0 = profundidad medida desde la superficie.

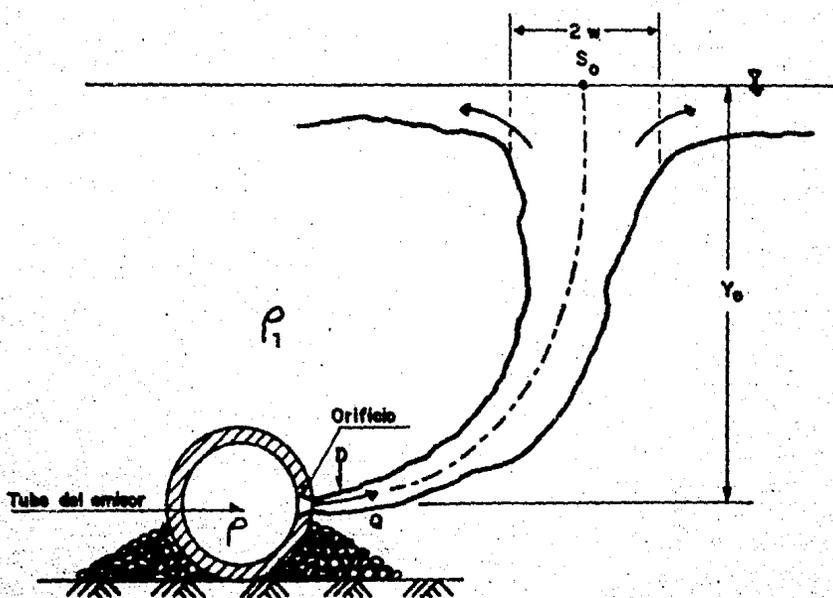
D = diámetro del chorro en el punto de descarga.

Q = gasto descargado por el chorro.

$g' = \frac{\Delta\rho}{\rho} g$ = aceleración aparente debida a la gravedad donde:

$\frac{\Delta\rho}{\rho}$ es la densidad relativa, general-

FIGURA 18
FORMACION DE UNA PLUMA



te.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0.026$$

La viscosidad no interviene directamente, ya que el número de Reynolds (R) en el chorro es demasiado alto, debido a la fuerte turbulencia.

Las cuatro variables pueden arreglarse matemáticamente en dos grupos que resulten adimensionales. Así,

$$\frac{Y_0}{D}, \quad Y$$

$$F = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{g' D}} = \frac{V}{\sqrt{g' D}} = \text{número de Froude}$$

donde:

V = velocidad estimada de descarga

Por lo tanto, la dilución S_0 es función de:

$$S_0 = f(Y_0/D, F)$$

3.4.2. Análisis de la dilución de una descarga en un medio estratificado.

Cuando el agua de la zona donde descargará un difusor se encuentra estratificada en su densidad por acción de la temperatura, es posible que la pluma de aguas descargadas se mantenga sumergida, siempre que la dilución de la mezcla agua residual-agua de mar consiga en ésta una gravedad específica mayor que el agua tibia de la superficie.

Brooks (Ref 5) propone un método sencillo para predecir un campo de mezclado de aguas residuales que resulte sumergido, siempre que se presente la estratificación de la densidad del sitio inmediato a la descarga y desarrollo de la pluma.

El problema se ha resuelto considerando una pluma simétrica, como la mostrada en la figura 19, y la siguiente notación:

Q_0 = gasto descargado por el origen (puntual o lineal), en pie^3/s .

q_0 = gasto por unidad de longitud del difusor, en pie^2/s .

ρ_d = densidad de las aguas residuales en la descarga, en $\text{libra masa}/\text{pie}^3$.

ρ_1 = densidad del agua de mar al nivel de la descarga, en $\text{libra masa}/\text{pie}^3$.

ρ_0 = densidad del agua de mar a la elevación y sobre la descarga, en $\text{libra masa}/\text{pie}^3$.

$\frac{d\rho_0}{dy}$ = gradiente de densidad, en $\text{libra masa}/\text{pie}^4$.

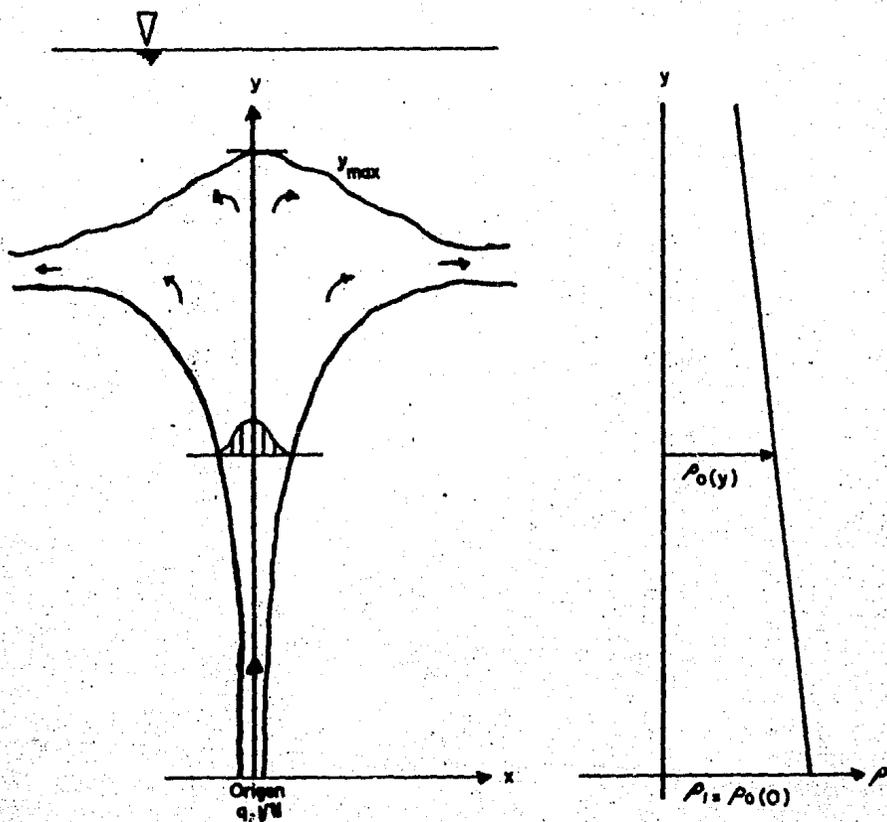
g = aceleración debida a la gravedad, en pie/s^2 .

Y_{max} = máxima elevación alcanzada por la pluma, en pie .

Además son necesarias las siguientes consideraciones:

1. Se supone el origen como un punto, o bien, como una línea.
2. El fluido se descarga con un momento inicial igual a cero.
3. La variación de ρ es pequeña.
4. El gradiente de densidad del medio oceánico es constante.
5. La pluma posee régimen turbulento y la rapidez de mezclado en la frontera de la pluma a la altura y , es pro-

FIGURA 19
FORMACION DE LA PLUMA
EN UN MEDIO ESTRATIFICADO



porcional a la velocidad y dimensiones de la pluma a dicha altura.

6. El perfil de densidad y la velocidad son "geométricamente" similares en todas las alturas.

La aplicación del método de Brooks nos permite conocer la altura que alcanzará la pluma de aguas residuales en un medio estratificado. Esto se puede modelar matemáticamente cuando la velocidad de ascenso es igual a cero:

$$U (y_{\max}) = 0$$

Una vez que la pluma ha alcanzado dicha elevación, pierde altura hasta que alcanza un nivel de equilibrio entre su densidad y la del medio, siendo aproximadamente de $0.8 y_{\max}$. Esto se puede observar en la figura 18. Durante el desarrollo del momentum la pluma cruza dicha posición de equilibrio, retornando a ella una vez que ha cesado aquél.

1. Fuente puntual.

Si se considera el origen del chorro descargado como un punto, de acuerdo a la ecuación de Morton et al. (Ref. 20) se tiene:

$$y_{\max}^4 = 198 \frac{\Omega_0 \sqrt{\rho_1} (\rho_1 - \rho_d)}{\sqrt{g} \left| \frac{d\rho_0}{dy} \right|^{3/2}}$$

Considerando que:

$$\sigma = (S_g - 1) \cdot 1000 \text{ (g/ml)}$$

donde:

S_g es la gravedad específica

$$Sg \text{ promedio} = 1.025$$

Brooks llega a:

$$y_{\max}^4 = \frac{6340 Q_0 (\sigma_1 - \sigma_d)}{\sqrt{g} \left| \frac{d\sigma_0}{dy} \right|^{3/2}}$$

Siguiendo con el análisis, Se obtiene el valor en porcentaje de la dilución final:

$$Sf = \frac{0.28 g^{1/8} (\sigma_1 - \sigma)^{3/4}}{Q_0^{1/4} \left| \frac{d\sigma_0}{dy} \right|^{5/8}}$$

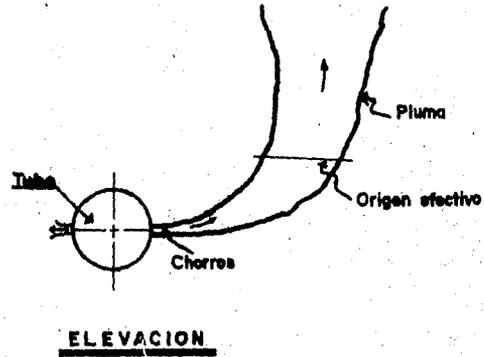
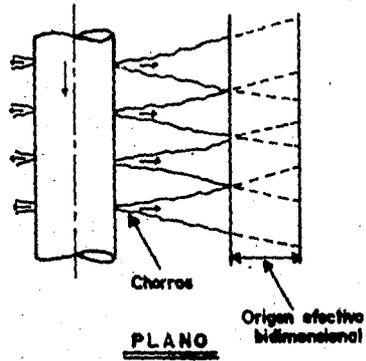
2. Fuente lineal

Se considera que una pluma inicia en una fuente lineal, cuando los orificios no están lo suficientemente separados entre sí, de modo que existe interferencia en el desarrollo de las plumas correspondientes a cada abertura. En particular, un chorro inicialmente es de geometría circular y expelido en forma horizontal, sin embargo, antes de que llegue a formarse el campo lineal por la interferencia, como la muestra la figura 20, se considera que la estratificación de la densidad es despreciable.

Esta configuración del campo de dilución obliga a otras consideraciones.

Siguiendo un procedimiento similar de análisis, la máxima altura alcanzada por una pluma de fuente lineal es:

FIGURA 20
PLUMA CONSIDERADA DE FUENTE LINEAL



$$y_{\max}^3 = \frac{610 q_0 (\sigma_1 - \sigma)^{3/4}}{\sqrt{g} \left| \frac{d\sigma_0}{dy} \right|^{3/2}}$$

y su correspondiente dilución final será dada por:

$$St = 0.41 \frac{g^{1/6} (\sigma_1 - \sigma_d)^{2/3}}{q_0^{1/3} \left| \frac{d\sigma_0}{dy} \right|^{1/2}}$$

CAPITULO IV

Diseño de emisores submarinos.-

Las especificaciones para el diseño de un emisor submarino abarcan los aspectos hidráulico y estructural, en las que convergen tanto la información básica mencionada, así como el análisis sanitario expuesto en el capítulo anterior.

El diseño hidráulico se concreta a encontrar la carga hidráulica necesaria para que el emisor funcione en condiciones óptimas: que la velocidad del flujo sea suficiente para que no se depositen sólidos dentro de la tubería, que los chorros se expelan con velocidad adecuada para que ocurra la dilución óptima, que no hay intrusión de agua de mar al tubo por los orificios.

Por otra parte, el diseño estructural contempla las sollicitaciones de que se

rá objeto, tanto al momento de su tendido como durante su vida útil, ya instalado. Son importantes también los mecanismos para sujetar la estructura al fondo, razón por la que se abordan.

4.1 Diseño Hidráulico.

Los requerimientos relativos a concentración de contaminantes descargados por medio de un emisor submarino se pueden alcanzar en la práctica de distintas maneras.

El empleo de difusores en la sección terminal de la tubería es el procedimiento con mayores ventajas, puesto que aprovecha la propiedad del establecimiento de un flujo a través de orificios en las paredes de la tubería. El punto de precaución para su diseño radica en las pérdidas de carga propias del flujo por orificios al que se le añaden las consabidas pérdidas por fricción producidas por el contacto entre el agua en movimiento y la pared interior del conducto.

A continuación se desarrolla la teoría hidráulica que permite conocer el funcionamiento práctico de un sistema de difusores dispuestos en la parte terminal de un emisor submarino.

4.1.1. Condiciones para el diseño de difusores.

Para que el diseño del sistema difusor de un emisor sea eficaz, deberán satisfacerse las siguientes condiciones:

1.- El gasto de descarga total debe estar igualmente distribuido entre los orificios del difusor.

En la práctica ésto se ha logrado colocando el difusor a una profundidad constante.

2.- La velocidad mínima (para los gastos máximos) deberá estar

entre 0.6 m/s y 0.9 m/s.

3.- Las pérdidas de carga en el sistema deben minimizarse para evitar, o mantener al mínimo, la necesidad de bombeo.

4.- Todos los orificios deben descargar aguas residuales; o sea, no debe haber intrusión de agua de mar. Según Brooks (Ref.5), esta condición se asegura cuando $F > 1$ donde $F = \frac{V}{\sqrt{g'D}}$

Una forma de lograr lo anterior es:

- reducir escalonadamente el diámetro del emisor en la zona de difusión, y
- que el área total de orificios en una sección transversal del difusor no excedan 1/2 a 2/3 el área total de dicha sección.

5.- En la práctica se han obtenido resultados más satisfactorios si:

- el diámetro de cada orificio es menor que 1/10 del diámetro del tubo, y
- el espaciamiento entre orificios es por lo menos 10 veces el diámetro de los orificios.

4.1.2. Desarrollo.

El análisis hidráulico de un difusor es esencialmente un procedimiento constituido por pasos o etapas, iniciándose en el extremo final de la tubería, que se contará como el primer orificio.

Cada orificio se considera lo suficientemente separado, de acuerdo a las condiciones ya señaladas, de modo que cada orificio funcione independiente del resto. Entonces, la descarga por cada uno de ellos se efectúa hidráulicamente separada.

Cabe señalar que las consideraciones relativas a descarga puntual o lineal hechas en el análisis sanitario respecto a la separación de las plumas de dilución, son diferentes a la separación expresada en los párrafos anteriores, que se limitan al funcionamiento hidráulico.

El problema se resuelve mediante el análisis de una descarga a través de un orificio en la pared de una tubería.

Sea un orificio cualquiera a través del cual se desea descargar un gasto q . La expresión matemática que relaciona las dimensiones del orificio y el gasto que éste es capaz de descargar, es

$$q = C_D a \sqrt{2 g E}$$

donde q = gasto descargado por el orificio

C_D = coeficiente de descarga del orificio

a = área del orificio en su parte más estrecha

g = aceleración debida a la gravedad

E = carga hidráulica que actúa sobre el orificio

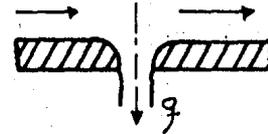
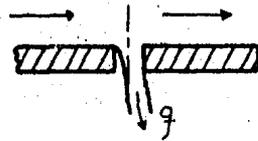
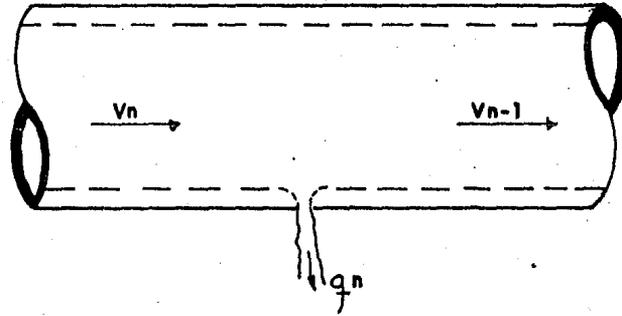
La figura 21 muestra una descarga lateral a través de un orificio en una tubería.

Es necesario indicar la siguiente consideración. De acuerdo con Mc Nown (Referencia 5), en las cercanías de un orificio que descarga, se considera nula la pérdida de carga por velocidad. Es decir, dado que la descarga es lateral, se considera válido tomar $V = 0$.

El coeficiente de descarga, C_D , no es constante a lo largo del difusor, sino que decrece a medida que las pérdidas por velocidad en la carga hidráulica se hacen mayores.

Brooks (Ref. 5) utiliza las relaciones empírico-experimenta-

FIGURA 21
DESCARGA LATERAL



les que a continuación se mencionan, siempre y cuando el número de Reynolds, $R = \frac{Vd}{\nu} > 20000$, en el flujo de la tubería:

1. Para flujo a presión, con orificios de pared rectangular - (ver figura 21):

$$C_D = 0.63 - 0.58 \frac{V^2/2g}{E}$$

2. Para flujo a presión, con orificios de pared redondeada - (ver figura 21).

$$C_D = 0.975 \left(1 - \left(\frac{V^2/2g}{E} \right)^{3/8} \right)$$

Estas relaciones sólo son aplicables para orificios pequeños que, como ya se mencionó, tengan un diámetro menor a la décima parte del correspondiente a la tubería.

En difusores submarinos se emplean orificios de pared redondeada, puesto que ofrecen menor pérdida de carga.

De acuerdo a la primera condición para el diseño, dada la necesidad de proporcionar un flujo uniforme en todos los orificios, el gasto en cada uno se puede expresar como

$$q = \frac{Q}{N}$$

donde Q = gasto de diseño en todo el sistema

N = número de orificios propuestos

Dado que el problema requiere la suposición del diámetro del primer orificio del sistema para de allí partir al cálculo de todos los demás, el punto de arranque consistirá en determinar la carga hidráulica necesaria en dicho orificio a partir de las ecuaciones mencionadas.

4.1.3. Procedimiento de cálculo.

El procedimiento de cálculo utilizado para diseñar un difusor puede ser formulado matemáticamente.

A continuación se detalla la nomenclatura empleada en el mismo.

- Sean:
- D = diámetro de la tubería
 - A = área de la tubería
 - d_n = diámetro del orificio n , contado a partir del más alejado de la playa
 - a_n = área del orificio n
 - V_n = velocidad media del flujo entre los orificios $(n+1)$ y n
 - $\Delta V_n = V_n - V_{n-1}$ = incremento en la velocidad debido a la descarga a través del orificio n .
 - $h_n = \frac{\Delta \rho_n}{\rho}$ = diferencia en la carga de presión entre los ámbitos interior y exterior inmediatos al orificio n
 - $E_n = h_n + \frac{V_n^2}{2g}$ = pérdida total de carga en el orificio n
 - C_D = coeficiente de descarga del orificio
 - q_n = gasto descargado por el orificio n
 - h_{fn} = pérdida de carga hidráulica debida a la fricción del líquido con la pared de la tubería entre los orificios n y $(n+1)$
 - L_n = distancia entre los orificios n y $(n+1)$
 - f = coeficiente de rugosidad de Darcy
 - Δz_n = cambio en la elevación entre los orificios $(n+1)$ y n . Está medido al centro del orificio y se considera positivo cuando el $(n+1)$ está por encima del n .
 - ρ = densidad de las aguas residuales
 - $\Delta \rho$ = diferencia de densidades entre el agua de mar y

residual.

$$\text{Por lo general } \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1.02 - 0.995}{0.995} = 0.025$$

R = número de Reynolds

ν = viscosidad cinemática del agua (a 20°C, -

$$\nu = 1.0050 \text{ centipoises})$$

1. El procedimiento inicia con la selección de E_1 .

Suponiendo válida para el último orificio la siguiente expresión:

$$q_1 = \frac{Q}{N} = 0.975 \left(1 - \frac{\left(\frac{Q}{Na_1}\right)^2}{2g E_1}\right)^{3/8} a_1 \sqrt{2g E_1}$$

2. Teniendo el gasto propuesto se procede a calcular la velocidad en la tubería

$$V_1 = \frac{q_1}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

3. Se calcula el coeficiente de descarga para ese orificio

$$C_D = 0.975 \left(1 - \frac{V_1^2}{2g E_1}\right)^{3/8}$$

4. Cálculo de q_1 de acuerdo a la expresión.

$$q_1 = C_{D1} a_1 \sqrt{2g E_1}$$

Si este gasto difiere del obtenido en el primer paso, se propone otra carga hidráulica E_1 y se repite el procedimiento. Una vez que coincidan estos valores, se pasa al siguiente punto.

5. Se calcula la velocidad real en el tubo entre los orificios 1 y 2:

$$V_1 = \frac{Q_1}{\Delta} = \frac{Q_1}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

6. Cálculo de la carga de velocidad, valuando el término

$$\frac{V_1^2}{2g}$$

7. Cálculo de E_2

7.1 Pérdida de carga por fricción

$$hf_1 = f \frac{L_1}{D} \frac{V_1^2}{2g}$$

$$R = \frac{V_1 D_1}{\nu}$$

7.2 Pérdida de carga por elevación

$$\frac{\Delta p}{\rho} \Delta Z_1 = \Delta L_1 s$$

$$7.3 E_2 = E_1 + hf_1 + \frac{\Delta p}{\rho} \Delta Z_1$$

8. Cálculo de q_2 :

$$q_2 = 0.975 \left(1 - \frac{V_1^2}{2g E_2}\right)^{3/8} a_2 \sqrt{2g E_2}$$

donde todas las variables del término de la derecha son conocidos.

Dado que este procedimiento es iterativo y harto laborioso, es recomendable el uso de la computadora para calcular, al final, -

la carga hidráulica necesaria para el funcionamiento del emisor.

Es preferible utilizar un sistema que funcione por gravedad, - por las ventajas que ello supone. De no alcanzarse la carga requerida, se deberá hacer uso de un equipo de bombeo, de modo que se proporcione la energía suficiente para ello.

4.2 Consideraciones estructurales.

La tubería que compone un emisor submarino se encuentra sometida a diferentes sollicitaciones propias de las condiciones ambientales del medio marino. Su colocación puede ser por debajo del lecho excepto en la parte del difusor, o sobre el fondo con una sujeción adecuada.

Para evitar riesgos por la acción del oleaje o sollicitaciones debidas a socavaciones alrededor del tubo es recomendable colocar a éste enterrado desde la playa hasta mar adentro de la zona de rompientes; en tal caso, el cálculo de la resistencia del tubo se hará considerando únicamente el material de relleno que soporta.

Cuando la tubería se coloca sobre el fondo marino ésta se encontrará sujeta a la acción del oleaje y las corrientes marinas. Sin embargo, cuando la profundidad del fondo es menor que la mitad de la longitud de onda del oleaje predominante, la influencia de éste se considera poco relevante.

Para tuberías tendidas sobre el fondo, las sollicitaciones de carga son producidas por las fuerzas hidrodinámicas originadas por las ondas y corrientes. Las ondas superficiales tienen asociadas a ellas un movimiento oscilatorio de las partículas de agua que puede ser significativamente dependiente de la profundidad del agua y de la altura de la ola. La velocidad de las partículas de agua en el fondo inducida por las olas pueden ejercer grandes fuerzas sobre tuberías expuestas, especialmente en regiones de agua poco profunda.

El estudio del flujo del fluido alrededor de un cilindro es un problema complejo, aún para situaciones de flujo estable. La interacción del flujo inducida por ondas y corrientes con tuberías sumergidas se complica grandemente por la influencia de la rugosidad de la tubería, el número y agrupamiento de tubos y la proximidad de la superficie y del fondo.

En el diseño de tuberías, las fuerzas hidrodinámicas inducidas por la acción de corrientes submarinas y ondas superficiales se consideran generalmente formadas por componentes de inercia, arrastre y flotación. Las fuerzas de inercia pueden interpretarse como aquellas debidas al gradiente de presión asociado a la aceleración relativa del fluido ambiental.

Las fuerzas de arrastre son, en general, debidas a la separación de flujo inducida por la velocidad relativa entre el fluido y la estructura. El componente perpendicular a la fuerza de arrastre, conocido como fuerza de flotación, es debido a remolinos que se forman alternativamente a cada lado del tubo.

Aún no existen soluciones analíticas que permitan describir completamente el problema de interacción fluido-tubería y los diseñadores deben recurrir a formulaciones semiempíricas.

Las fuerzas de inercia y arrastre pueden definirse en términos de los coeficientes de inercia (C_M) y de arrastre (C_D), respectivamente. La ecuación convencional usada para calcular las fuerzas hidrodinámicas es la ecuación de Morison; ésta se basa en la suposición de que la fuerza total de la ola sobre un objeto puede obtenerse sumando linealmente los componentes de arrastre y de inercia en la siguiente forma

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| + \frac{\pi}{4} C_M \rho D^2 \ddot{u}$$

donde F = fuerza de la ola por unidad de longitud sobre un elemento de tubería; ρ = densidad de masa del agua de mar y D = diámetro del cilindro. En esta ecuación el arrastre es proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido (u) y la inercia es proporcional a la aceleración del fluido (\dot{u}).

La fuerza de flotación (F_L) por unidad de longitud de tubería pueden definirse en forma análoga a la fuerza de arrastre

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho D u^2$$

donde C_L = coeficiente experimental de flotación.

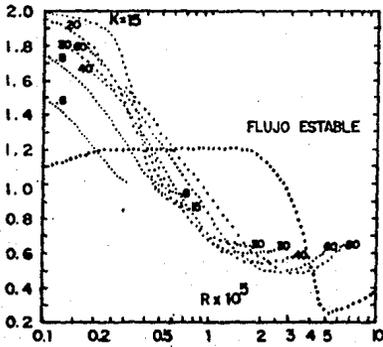
La confiabilidad de estas ecuaciones semiempíricas depende mucho de la validez de los coeficientes de fuerza y las teorías de ondas que predicen la cinemática de las partículas de agua. Se ha realizado mucho esfuerzo para obtener valores experimentales de estos coeficientes; el estudio de laboratorio más representativo para condiciones de flujo oscilatorio es el de Sarpkaya (1976), quien obtuvo una relación entre los coeficientes y el número de Reynolds (ver figuras 22a, b y c).

La información acerca de mediciones en el océano de las fuerzas sobre tuberías submarinas es escasa. Grace et. al. (1976) reporta resultados para una tubería de prueba prototipo bajo la acción de ondas en aguas con 37 pies de profundidad (ver figura 22d).

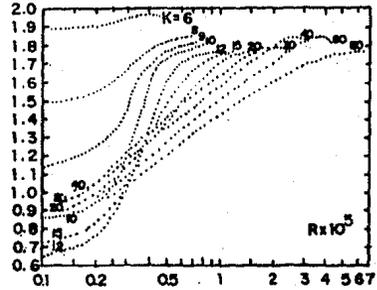
4.3 Materiales de las tuberías.

La tubería del emisor submarino debe poseer las características suficientes que le permitan funcionar de un modo adecuado, tal y como lo estipulan los diseños hidráulico y sanitario. Las condiciones particulares de cada caso indicarán los requerimientos a satisfacer,

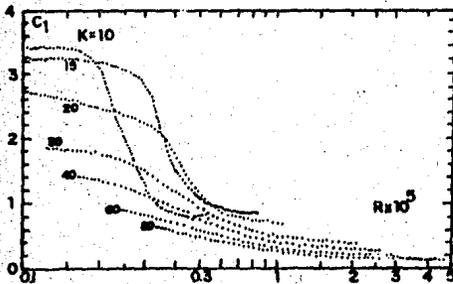
FIGURA 22 COEFICIENTES EXPERIMENTALES HIDRODINAMICOS



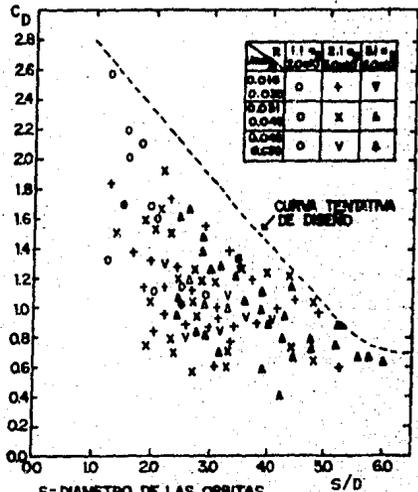
A) COEFICIENTE DE ARRASTRE vs. NUMERO DE REYNOLDS. PARA VALORES CONSTANTES DE K .



B) COEFICIENTE DE INERCIA vs. NUMERO DE REYNOLDS.



C) COEFICIENTE DE FLOTACION vs. NUMERO DE REYNOLDS.



S = DIAMETRO DE LAS ORBITAS
 D = DIAMETRO DE LA TUBERIA

D) COEFICIENTE DE ARRASTRE DEPENDIENTE DE LA DISTANCIA RELATIVA DE LA ORBITA, DE UNA PARTICULA DE AGUA.

como las especificaciones de resistencia, ductilidad y capacidad.

Se han llegado a utilizar tuberías de hierro fundido, concreto reforzado, hierro dulce, acero, duela, hierro corrugado y barro vitrificado, así como tubería plástica: polietileno de alta densidad, PVC y fibra de vidrio reforzada (Ref. 12). Sin embargo, la tecnología actual ha hecho que el concreto reforzado, el acero y el plástico sean lo más empleados por satisfacer los requerimientos ya señalados.

- Tubería de acero

Debido a que este material es más fuerte que el hierro fundido y ambos tienen gravedad específica similar, se pueden lograr piezas más ligeras de acero y, consecuentemente, mayor facilidad para su transporte y colocación.

Existe una amplia variedad de fabricantes y la ventaja sobre otros materiales es su diversidad de diámetro. Los procedimientos de costura helicoidal permiten obtener dimensiones especiales para su diseño particular, además de estar disponible en distintos espesores para alcanzar la resistencia especificada en el diseño, así como en longitudes requeridas para su transporte y manejo. Otros fabricantes utilizan procedimientos de lámina soldada longitudinalmente.

El acero está sujeto al efecto de la corrosión dentro del medio marino, por lo que es necesario dotar a la tubería de un recubrimiento adecuado, como se explica en el capítulo correspondiente al mantenimiento de la misma.

- Tubería de concreto

La tubería de concreto es muy resistente al ataque del agua marina y de los organismos de ese medio. Se le emplea siempre reforzada de acero, añadiéndosele en ocasiones un alma cilíndrica de dicho material, cuando alguna sección vaya a someterse a altas presiones o so-

licitaciones.

En el cuadro No. 7 se proporcionan con detalle las características de las tuberías más usuales de concreto reforzado. Generalmente se fabrican en tramos de 2.50 m, pudiéndose solicitar tramos mayores por encargo especial al fabricante, dado que mientras sean más largos se economizará tiempo en el tendido.

CUADRO No. 7

DIMENSIONES Y PESO DE TUBERIA ESTANDAR DE CONCRETO REFORZADO

| Diámetro interior | | Espesor (mm) | Peso aproximado (N/m) |
|-------------------|------|-----------------|--------------------------|
| (pulgadas) | (mm) | | |
| 24 | 610 | 102 | 4 980 |
| 30 | 762 | 102 | 6 070 |
| 42 | 1067 | 114 | 10 670 |
| 48 | 1219 | 127 | 13 430 |
| 60 | 1524 | 152 | 19 850 |
| 72 | 1829 | 178 | 27 510 |
| 84 | 2134 | 203 | 36 480 |
| 96 | 2438 | 216 | 43 930 |
| 120 | 3048 | 254 | 63 990 |

Fuente: Ref. 12 y Tubos Dysa

- Tubería plástica

Este material posee una excelente resistencia al ambiente corrosivo, así como ligereza y flexibilidad. Aparentemente estas tres son las características ideales para un emisor submarino: la ligereza permite un fácil manejo durante la construcción, mientras la flexibilidad le confiere ajustarse a la morfología natural del fondo sin gran riesgo de fallar. En ocasiones, el poco peso es contrarrestado desde su confección al dotarlo el fabricante de lastre sujeto a su pared, pretendiendo con ello que no emerja al momento de su colocación en el fondo marino.

Las tuberías de plástico empezaron a utilizarse para emisores submarinos en la década de los setentas, razón por la que están en desventaja respecto a las de otros materiales, que dado su prolongado uso han probado su efectividad, factor de suma importancia en obras de este tipo.

El uso limitado de este material para tuberías de diámetros propios de emisores submarinos en nuestro país, hacen, si no nula, sí escasa su disponibilidad en el mercado nacional.

Los fabricantes de tuberías, cualquiera que sea su material, proporcionan las especificaciones de sus productos de acuerdo a:

- calidad del material y su norma de fabricación
- dimensiones (diámetro, espesor y longitud de las secciones)
- peso unitario
- presión de prueba

Debido a la importancia y a las condiciones especiales que rigen a un emisor submarino, todos los materiales que intervienen en la obra deben ser de primera calidad y deben cumplir los requisitos que marcan las normas particulares para cada cual.

El diseño y la fabricación de tubería de concreto deberán cumplir las especificaciones ASTM C361 y la tubería de acero la C201 AWWA. El acero de refuerzo de la tubería de concreto reforzado se ajustará a la ASTM A615 Grado 40.

Grace (Ref. 12) enlista 50 emisores construidos desde 1939 hasta 1977, donde es posible observar, comparativamente, la durabilidad de los distintos materiales. Las tuberías fabricadas de acero y concreto reforzado son las que, por su antigüedad y frecuencia, pueden anotarse como las más recomendables. El uso de tuberías de hierro se limitó a las primeras décadas, seguramente por las ventajas que presentó el acero. Las tuberías plásticas se han empleado a partir de 1969 y en países con tecnología avanzada en la fabricación de plásticos de alta resistencia. Su confiabilidad de acuerdo a su durabilidad sólo podrá determinarse con el paso del tiempo.

El mar posee un poder abrasivo tal que hace necesario dotar a la tubería, sea de concreto o metálica, de un recubrimiento que la proteja convenientemente, así como del ataque de las aguas residuales, tanto por su composición como por los esfuerzos abrasivos consecuentes al flujo constante que durante muchos años habrá de soportar el emisor.

En la actualidad existen recubrimientos plásticos de extraordinaria estabilidad química que proporcionan una protección anticorrosiva efectiva. Esta deberá permanecer en condiciones útiles por lo menos un tiempo igual a la vida útil del emisor.

Para tuberías metálicas, existen diversas maneras de lograr un recubrimiento anticorrosivo efectivo, tanto en su exterior como en su interior. Uno de estos últimos se describe:

- limpieza de la superficie con chorro de arena blanca de metal

- aplicación de una protección galvánica
- cubierta de alquitrán de hulla epoxi
- aplicación de una capa de fibra de vidrio petatillo
- finalmente 2 capas de alquitrán de hulla epoxi

Este recubrimiento, que llega a medir de 8 a 10 cm de espesor, puede durar hasta 25 años aproximadamente (Ref. 36).

Se puede lograr un recubrimiento de igual eficiencia aunque de menor durabilidad aplicando 4 ó 5 capas sucesivas de recubrimiento epóxico esmaltado con alto porcentaje (95%) de sólidos después de la capa primaria.

Los recubrimientos exteriores de la tubería son menos complicados, bastando aplicar 3 capas de recubrimiento de alquitrán de hulla epoxi, con un espesor final de 2 cm después de limpiar el exterior con chorro de arena de metal blanco y la aplicación del primario inorgánico lográndose una duración estimada de 15-20 años.

Como los recubrimientos se harán en tierra firme, ya sea en la orilla o en planta, se dejará libre una ceja en cada extremo para permitir la conexión por soldadura y resane submarino.

La tubería puede en ocasiones recubrirse de concreto armado, con refuerzo de malla de acero en su interior y con refuerzos longitudinal y helicoidal en su exterior, obteniéndose una protección muy eficiente tanto contra el ataque de las aguas residuales como contra el agua de mar, siempre y cuando se utilice para la elaboración de concreto, cemento resistente a los sulfatos (tipo V) y algún aditivo que proporcione al concreto las características de resistencia necesarias.

4.4 Procedimiento constructivo.

La decisión sobre el tipo de emisor que se construirá estará en función de las características del fondo marino, el tamaño y tipo de tubos, las condiciones del medio (atmosféricas y oceanográficas), los esfuerzos a que se verá sometida una línea al ser instalada, del equipo disponible para efectuar la obra, así como la optimización de costos del tendido de la tubería.

Es necesario considerar la factibilidad constructiva en el diseño hidráulico, para que de esta manera la opción elegida en cuanto a proceso constructivo no sea excesivamente onerosa. La adecuada previsión en este aspecto puede reducir de manera apreciable la mayor inversión de un emisor submarino: su proceso constructivo.

Los procedimientos constructivos son varios:

1o. Construido en la costa y jalado hasta su posición final.

Cuando el lecho marino sea irregular o de tipo rocoso, o si se necesita un gran diámetro de tubería, será conveniente construir un emisor por este procedimiento que, aunque costoso, tiene la ventaja de resistir tormentas o accidentas navieros sin perjudicar su comportamiento hidráulico. Generalmente la tubería es de concreto armado.

Con este método la instalación de la tubería se realiza uniendo varias secciones de ésta en la playa. Entonces se montan sobre rodillos en pendiente y se jalan por el fondo hasta su posición final, para lo cual se valen de remolcadores. Finalmente la tubería se fija al fondo con atraques de concreto o rellenos de piedra y grava.

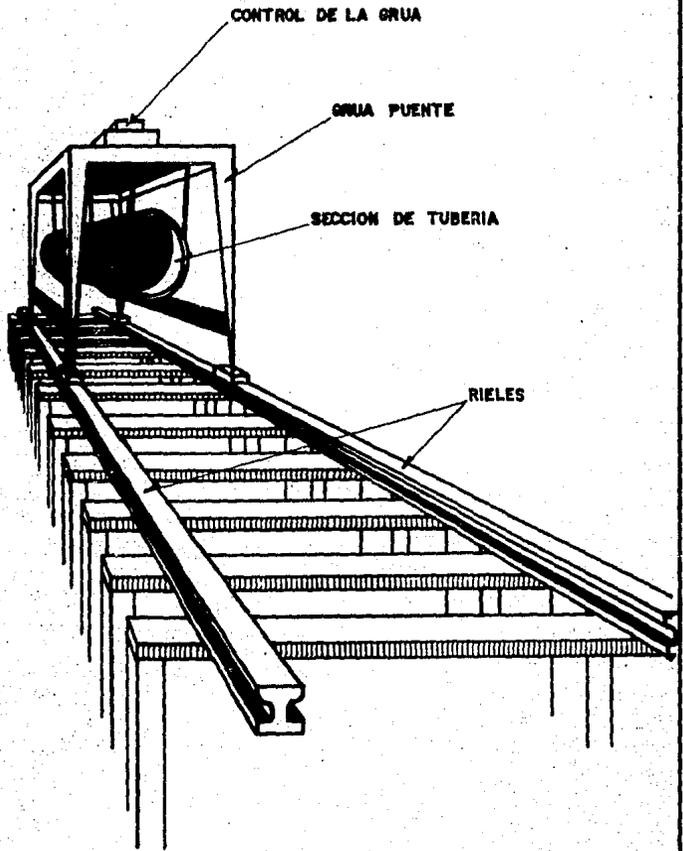
2o. Procedimiento de la barcaza de tendido.

Quando se tiene el caso de un lecho arenoso y con una inclinación constante o suave, y además que existan condiciones de oleaje y marea favorables, entonces se podrá utilizar este procedimiento. Esto es, se depositará la tubería en el fondo y se fijará con rellenos o anclajes de concreto. Generalmente se utiliza tubería metálica y su estabilidad está condicionada por las características de arrastre de fondo y frecuentemente la tubería deberá ser lastrada para garantizar su estabilidad y evitar su flotación durante la construcción. Esto puede lograrse mediante una tubería de mayor espesor o con una protección de concreto que le dé mayor peso propio o llenando provisionalmente la tubería con líquido para evitar su flotación durante la etapa constructiva. En este método, también conocido como el de la barcaza de tendido, se utiliza un bastidor, que es una estructura metálica asentada en el fondo marino. Se utiliza en aguas donde las embarcaciones no pueden entrar, en aguas de poca profundidad. El bastidor está constituido por tubos o vigas de acero unidos con pernos para facilitar su recuperación. Sobre el bastidor se coloca una grúa viajera montada sobre rieles que realizará no sólo la colocación de los tubos, sino que también se encargará de hincar y de deshincar los pilotes sobre los cuales se apoya. Mientras tanto, otra grúa simultáneamente protege la estructura mediante placas de hierro hincadas con un martillo vibratorio o simplemente inicia la excavación. Esta estructura se presenta en la figura 23.

Quando las profundidades son mayores, lo más común es utilizar una barcaza que cunete con equipo suficiente para manejar eficazmente las tuberías.

Los métodos como el de Stinger, efectúan todas las actividades como el maquilar, soldar y radiografiar en la cubierta. Gene-

FIGURA 23
BASTIDOR CON GRUA VIAJERA



ralmente tienen capacidad para almacenar de 4 a 7 tubos, los cuales son suministrados periódicamente por otra embarcación. Para lograr este método es necesario que la embarcación cuente con una máquina tensadora y una rampa en la popa. La finalidad de la tensadora es sujetar la línea de tuberías que va siendo lanzada por la rampa después de haberla soldado y radiografiado, mientras que la razón de la rampa es la de ampliar el radio de curvatura de la tubería para evitar los grandes esfuerzos que con seguridad la dañarían. La longitud y curvatura de la rampa pueden ser modificadas dependiendo de la profundidad del fondo marino y del radio máximo de curvatura de la tubería. El método se representa en la figura 24.

3o. Procedimiento de la grúa flotante.

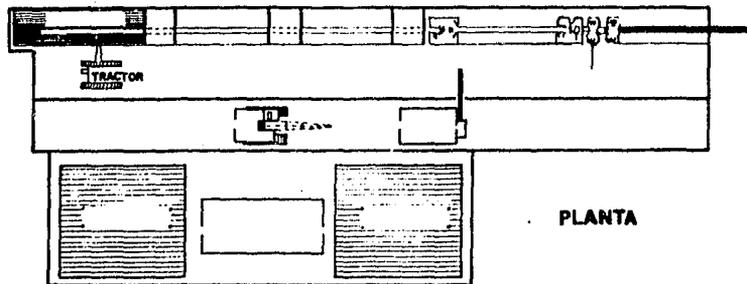
Este método emplea una grúa que coloca desde la barcaza los tubos en el fondo marino. Este método se recomienda utilizarlo cuando las uniones no van soldadas. La figura 25 muestra el proceso de colocación.

La alineación de la tubería se hace con un dispositivo conocido como "caballo". Este está formado por vigas de acero sobre el que se desplaza una grúa en las cuatro direcciones. Los tubos son colocados y alineados por dicha estructura de 12 x 12 m y es trasladada por la grúa flotante descrita anteriormente. El caballo es izado hacia la cubierta, donde toma otra unidad y se vuelve a sumergir a la nueva posición. La figura 26 muestra lo anterior.

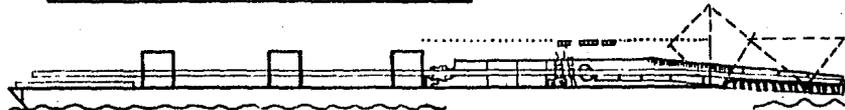
4o. Construido en la superficie y mantenido en flotación, es sumergido.

La construcción de un emisor por este método está generalmente limitado a bahías y esteros, ya que sólo estos cumplen con las condiciones favorables de fondo suave y pendiente uniforme, así como un oleaje casi inexistente. En este proceso se pueden utilizar tu-

FIGURA 24
METODO DE STINGER



PLANTA



BARRA LARGA Y MECANISMO VISTO DE LADO



MECANISMO VISTO DE LADO

FIGURA 25
METODO DE LA GRUA FLOTANTE

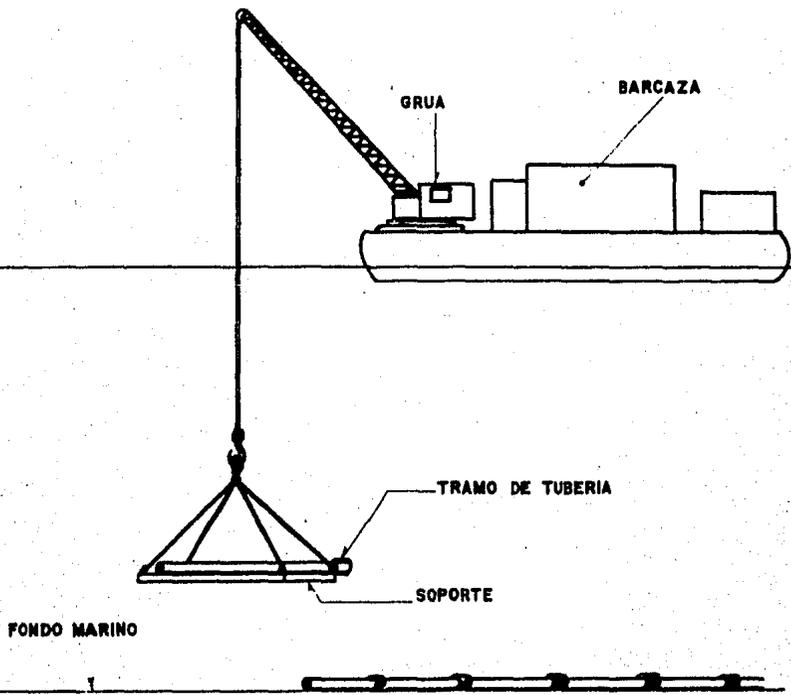
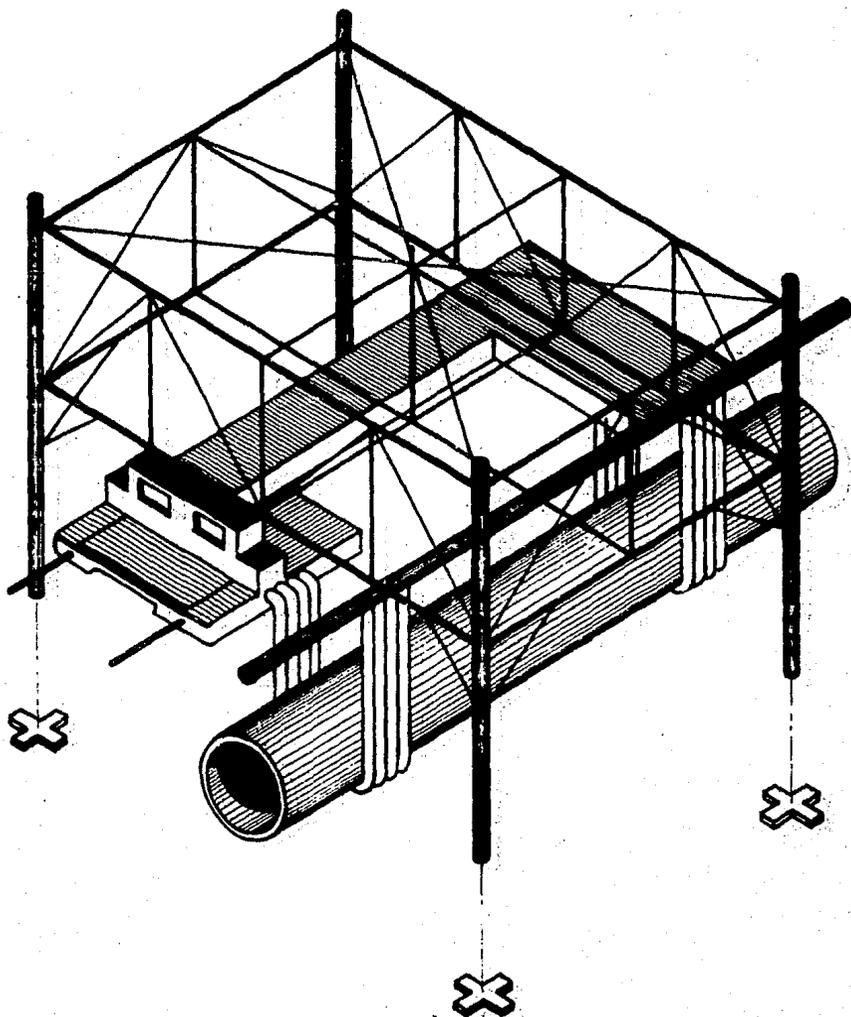


FIGURA 26
DISPOSITIVO DE INSTALACION
" CABALLO "



berías metálica o PVC y su costo es menor a los anteriores, ya que su construcción requiere una reducida actividad marina.

Sin lugar a dudas el proceso más complejo referente a colocar la tubería en el lecho marino según todas las especificaciones de proyecto es la relativa a tramos de tubería de concreto armado, ya que necesita un equipo completo de excavación submarina, la colocación de rellenos y camas apropiadas para el apoyo de los tramos, equipo de precisión para el alineamiento y un costoso junteo a base de empaques de neopreno, aunado todo esto a una calificada cuadrilla de ingenieros y trabajadores (buzos) que llevan a cabo la obra y su supervisión en el fondo del mar.

El diseño de juntas de la tubería merece especial atención en su diseño y realización, ya que cumplen una importante función dentro del sistema del emisor, que es mantener unidos los tramos de tubería para conservar en todo tiempo hermético el emisor.

Existen diversos métodos de juntas, de los cuales se escogerá el más conveniente según el diseño constructivo.

Cuando se trate de una tubería metálica que se deposite por medio del proceso de jalado, las juntas de soldadura deberán ser capaces de resistir el proceso y seguir siendo herméticas.

En emisores con tubería de concreto, las juntas con empaque de hule, aunque complicadas, son recomendables por la flexibilidad que le confieren a la estructura, posibilitando pequeños movimientos para correcciones que la tubería por sí sola no toleraría.

Todo tipo de juntas deben ser sometidas a la prueba de control de calidad "in situ" para garantizar la hermeticidad del emisor.

4.5 Sujeción al fondo marino.

Estando la tubería ya instalada, debe garantizarse su estabilidad y fijación al terreno debiendo soportar oleajes, corrientes y arrastres sin menoscabo de su capacidad y sin permitir desplazamiento alguno. Para ésto se usarán anclajes, rellenos o se sepultará la tubería en zanjas o cualquier otro tipo de fijación que asegure su estabilidad estructural, como se muestra en la figura 27.

En el caso de un emisor que esté sólo depositado en el lecho, el suelo deberá tener la suficiente capacidad de carga. Si no la tiene, se removerá parte del suelo blando y se reemplazará con material de relleno, pudiendo ser necesaria una fijación por medio de rellenos.

Cuando se requiera zanjar la tubería, se removerá el material hasta la profundidad deseada, se pondrá una "cama de roca" y se colocarán los rellenos (Ref. 4), según lo muestra la figura 28.

La zona crítica donde puede sufrir daños el emisor es la zona de rompientes, y en esta región deberá determinarse el nivel más bajo de erosión y la parte más alta de la tubería (corona) deberá quedar por debajo de este nivel. Cuando exista fuerte oleaje y un arrastre litoral considerable se usará un tablaestacado durante la construcción que quedará fijo impidiendo que el emisor se vea perjudicado por ocasionales tormentas, sin embargo este tablaestacado, generalmente metálico, no deberá constituir un obstáculo para el desplazamiento de la arena del fondo. Ver figura 29.

Este tablaestacado puede ser recomendable usarse también cuando el ángulo de reposo del material del fondo sea muy grande y que dificulte la excavación de zanjas a "cielo" abierto.

FIGURA 27 TIPOS DE SUJECION DE LA TUBERIA AL FONDO MARINO

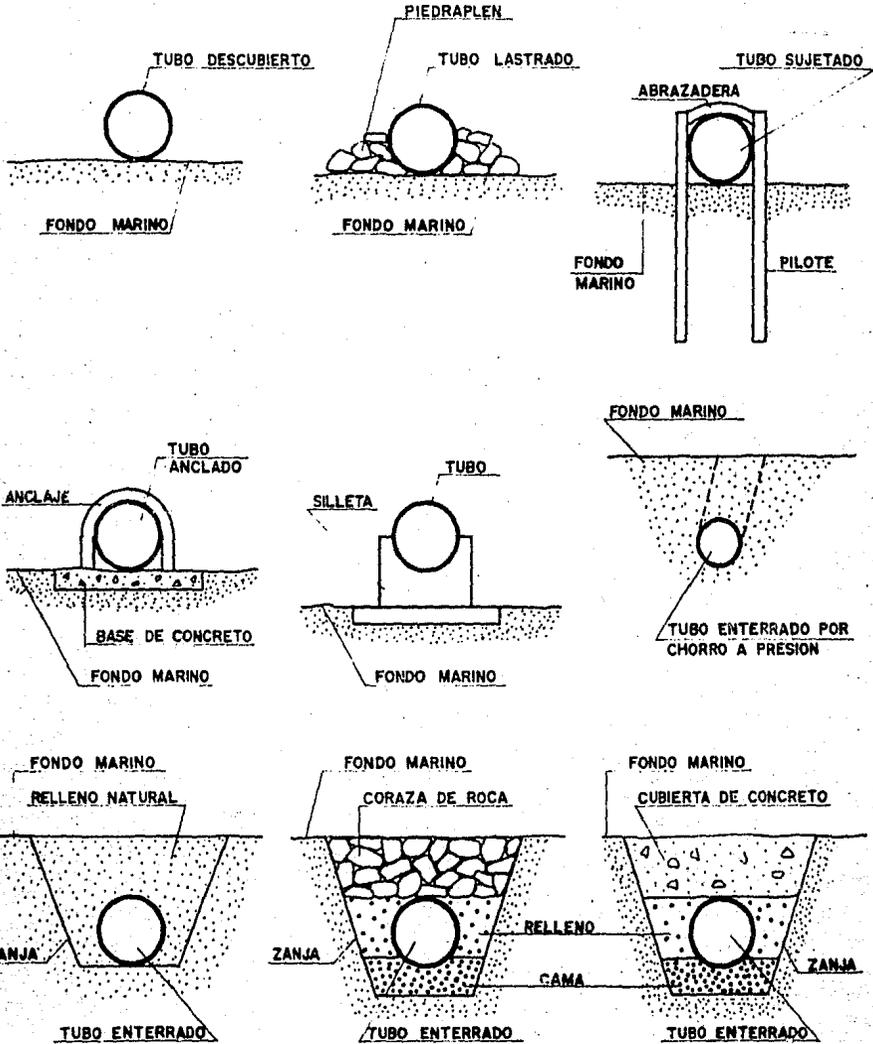
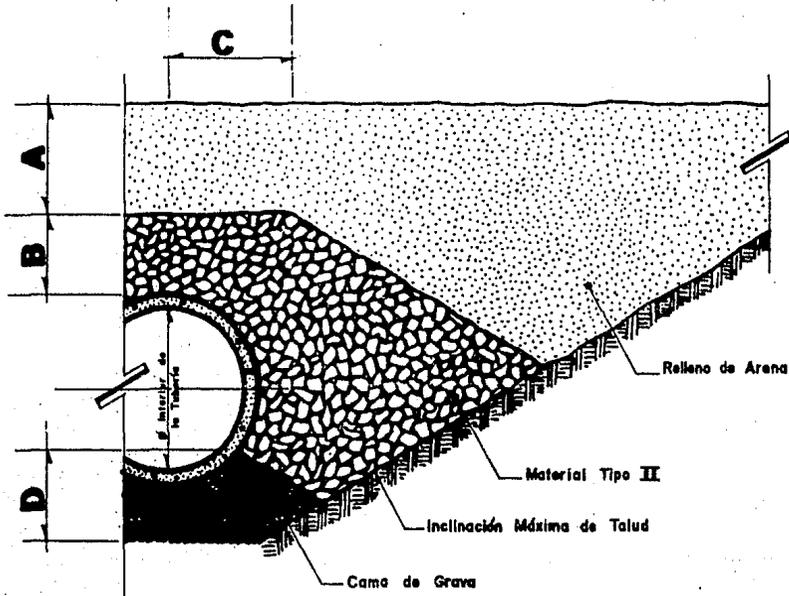


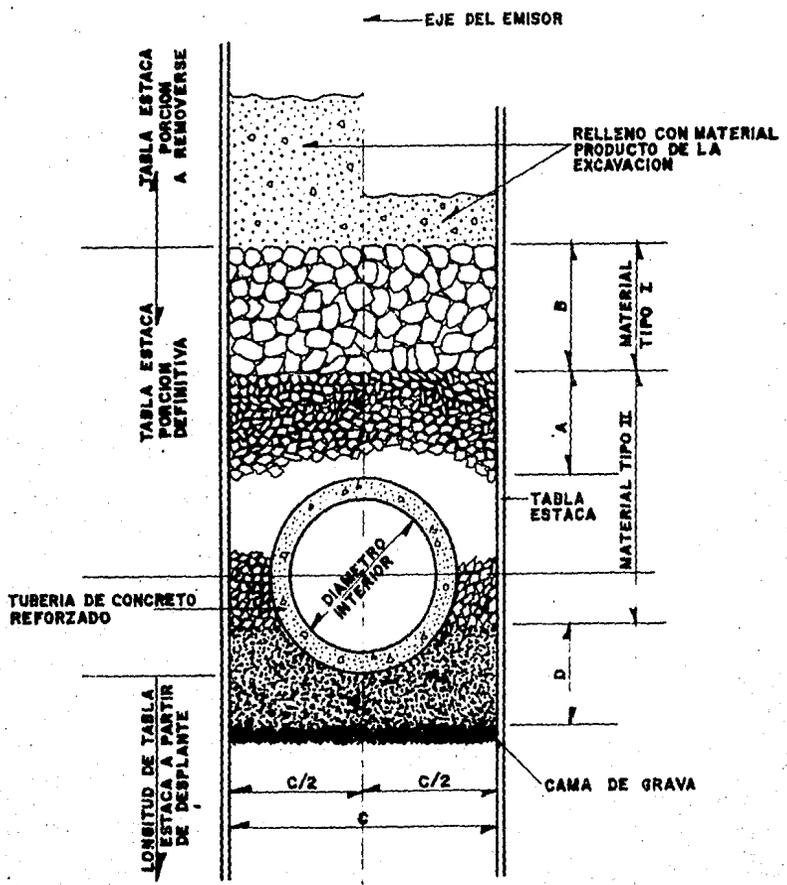
FIGURA 28

SECCION TIPICA DE UN EMISOR EN ZANJA



- A** = En función de arrastre de sólidos
- B** = En función de arrastre de sólidos
- C** = En función del diámetro de la tubería
- D** = En función del diámetro y peso de la tubería

FIGURA 29 SECCION TIPICA EN LA ZONA DE ROMPIENTES



- A = EN FUNCION DEL ARRASTRE DE SOLIDOS
- B = EN FUNCION DEL ARRASTRE DE SOLIDOS
- C = EN FUNCION DEL DIAMETRO DE LA TUBERIA
- D = EN FUNCION DEL DIAMETRO Y PESO DE LA TUBERIA

4.6 Supervisión y mantenimiento.

Un efectivo sistema de mantenimiento es primordial para obtener el funcionamiento óptimo del difusor a lo largo de los años. Sólidos y arena, así como acumulaciones de grasas en la parte alta de la sección terminal del difusor deberán ser removidos para permitir el flujo de las aguas de desecho.

El método más común de limpieza de la tubería es el llamado "Hydraulic flushing," que no es sino expulsar a presión los elementos que azolvan el emisor. Se utilizan también dispositivos limpiadores que viajan a todo lo largo de la tubería y que deberá preverse su libre travesía sin que se atoren dentro de la misma.

En ocasiones el difusor contará con una compuerta en su parte terminal que pueda ser abierta y desalojar la materia indeseable que se encuentre dentro de la tubería. Además en emisores de gran diámetro existirán bocas de acceso para permitir que un buzo entre a la tubería y le dé el mantenimiento requerido. Al mismo tiempo se permite una fácil verificación de las juntas, que es complicado hacer en emisores con tuberías de diámetros muy grandes.

Los accesos a la tubería no existirán en la zona de rompientes si el oleaje es fuerte y deberán estar separados lo suficiente para que un buzo pueda recorrer la mitad del camino al otro acceso.

Un buzo deberá revisar periódicamente angostamientos parciales de los orificios causados por la acumulación de materia grasosa, fauna marina u otras causas, además revisará la estabilidad del suelo en el que se apoya el emisor.

Cuando el emisor requiera servicio de mantenimiento, siempre habrá señalamientos y avisos que así lo indiquen en las áreas que puedan ser afectadas, asimismo es deseable un sistema de recolección de ma

teria flotante en la superficie.

Por otra parte, en ocasiones un mantenimiento exterior será necesario, debido a que las corrientes formen acumulaciones de arena en la zona de descarga que deberán ser removidas. Puede también darse el caso contrario, que exista socavación bajo el emisor y tenga que ser protegido con rellenos o fijaciones al suelo.

CAPITULO V

Conclusiones y recomendaciones:

Una de las intenciones de este trabajo es difundir un procedimiento, sencillo en su concepción, más laborioso en su consecución, que permite aprovechar una propiedad de los fluidos que son conducidos por una tubería a presión, para contribuir a la solución de uno de los problemas más graves en nuestro país hoy en día, como es la salud en los centros de población, específicamente en las ciudades costeras, por demás en auge.

Es posible que la gran capacidad de depuración del mar soporte todavía la disposición rudimentaria y casi siempre improvisada de las aguas residuales durante algún tiempo, (pero finito). Sin embargo el mayor riesgo se corre, tal como se expresó, al concentrar en espacios reducidos y con circulación restringida las descargas, y ese, precisamente, es un problema ya presente en importantes puertos.

La defensa de nuestro patrimonio natural sería, después del riesgo sanita

rio que significa para el hombre, otra razón suficiente para impulsar un programa de saneamiento en las costas.

Indiscutiblemente, la alternativa de emplear un emisor submarino, combinado con un tratamiento primario, constituye generalmente la opción sanitaria y económica más conveniente. Esta aseveración está fundada en casos prácticos propuestos y ya realizados.

Se puede suponer que la tecnología de los emisores submarinos es sofisticada, fuera de nuestras posibilidades. La realidad es otra.

Cierto que en los Estados Unidos existen algo más de 500 emisores submarinos, muchos de los cuales funcionan en combinación con un tratamiento secundario.

Cabe recordar la cita de Salas (Ref. 27) del primer capítulo, en la que advierte de la inconveniencia de adoptar políticas tan exigentes para países latinoamericanos, cuando se pueden lograr resultados satisfactorios combinando emisores de mayor longitud con menor grado de tratamiento en las aguas por descargar.

Una muestra de la capacidad de nuestro país para utilizar esta tecnología la dan los emisores que actualmente funcionan en algunos puertos (Mazatlán, Puerto Vallarta, Campeche), tal vez auxiliados en algunos aspectos por expertos extranjeros, pero creo que en la actualidad se cuenta con los profesionistas calificados para un desarrollo sistemático en el área práctica. Es recomendable, por tanto, el establecimiento de un plan formal de investigación con apoyo a la práctica profesional.

Una de las tareas del Ingeniero Civil es la de procurar la protección al ambiente que la naturaleza nos ha confiado, en especial, pródigamente a los mexicanos.

Sea este trabajo una contribución a ello.

R E F E R E N C I A S

1. Abraham, G.: Jet diffusion in stagnant ambient fluid. Delft Hydraulic Laboratory. Pub. 29, 1963
2. Audibert, J.M.E. et al: Design of pipelines to resist sea-floor instabilities and Hydrodynamic forces. Journal of the Geotechnical Engineering Division, A.S.C.E. 1977
3. Bachá Peña, M.C.: Consideraciones generales para el diseño de descargas submarinas de aguas residuales municipales. Trabajo de grado. D.E.P.F.I. U.N.A.M., 1985
4. Beckman, W.J.: Engineering considerations in the design of an ocean outfall. Journal W.P.C.F. Oct. 1970.
5. Brooks, N.H.: Conceptual design of submarine outfalls. Ed. by Russell G. Ludwig, U.S.A., 1970.
6. Burchett, M.E., G. Tchobanaglou, A.J. Brudoin: A practical approach to submarine outfall calculations. Public Works, May 1967.
7. California State Water Pollution Control Board: Investigation of current measurement in estuarine and coastal waters. U.S. Naval Oceanographic Office. U.S.A., 1959.
8. Chávez Salcedo, G.: Principios de Oceanografía. C.E.C.S.A., México, 1975.
9. Davis, R.A.: Principles of Oceanography. Addison-Wesley Publishing Company. U.S.A., 1972.
10. Engineering Science Inc.: Marine waste disposal system. E.S.I. U.S.A., 1971
11. Environmental Protection Agency: Monitoring industrial wastewater. U.S.A., 1973.
12. Grace, R.A.: Marine outfall systems. Planning, design and construction. Prentice-Hall, Inc. U.S.A. 1978.

13. Grace R.A., S.A. Nicinski: Wave force coefficients from pipeline research in the ocean. 8th Annual Offshore Technology Conference. Houston, 1976.
14. Hyperion Engineers: Ocean outfall design, final report to the City of Los Angeles, 1957.
15. Houghes, J.D.: La ecología de las civilizaciones antiguas. F.C.E. México, 1981.
16. Marzinelli, M.A.: Alternativas tecnológicas de la disposición de líquidos residuales en las ciudades costeras. O.P.S. Argentina, 1984.
17. Maza Alvarez, J.A.: Hidráulica Marítima. Manual de diseño de obras civiles, Cap. A.2.13. C.F.E., México, 1983.
18. Menéndez Martínez, C.M.: Ingeniería Ecológica, apuntes del curso, Facultad de Ingeniería, UNAM. 1985.
19. Metcalf and Eddy, Inc.: Wastewater Engineering. Treatment, disposal and reuse. Mc Graw-Hill Book Company. U.S.A., 1979.
20. Morton, B.R. et al: Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. Proc. Roy. Soc. A. Vol. 234, Jan-Mar 1956.
21. Muir Wood, A.M.: Coastal hydraulics. Mac Millan. U.K., 1969.
22. Murillo Bagundo, J.L.: Ingeniería Marítima, apuntes del curso, Facultad de Ingeniería, UNAM. 1985.
23. Paape, A., H.N.C. Breusers: Influence of pile dimensions on forces exerted by waves. X Conf. Coastal Engineering, Paper 2.4, Tokio, 1966.
24. Pearson, E.A.: An investigation of the efficacy of submarine outfall disposal of sewage and sludge. California Water Pollution Control Board. Pub. 14, 1956.
25. Postiglioni, O.J. et al: Aspectos metodológicos del planteamiento de un emisario submarino para la ciudad de Mar del Plata. XIX Congreso A.I.D.I.S. Chile, 1984.

26. Rawn, L.M., F.R. Bowerman, N.H. Brooks: Diffusers for disposal of sewage in sea water. Proceedings A.S.C.E., Vol. 86, No. SA2, 1960.
27. Salas, H.J.: Manual preliminar para el planeamiento y el diseño conceptual de emisarios submarinos en América Latina y el Caribe. C.E.P.I.S., 1984.
28. S.A.R.H.: Técnicas de muestreo y análisis de aguas litorales. México, 1980.
29. S.A.R.H. y S.S.A.: Reglamento para la prevención y control de la contaminación de las aguas. Diario oficial del 29 de marzo de 1973. México.
30. SEDUE: Evaluación rápida de fuentes de contaminación al agua, suelo y aire, México, 1984.
31. Sevilla, M.L.: Introducción a la Ecología Marina. I.P.N. México, 1977.
32. Stewart, R.E. et al.: Diffusion of sewage effluent from ocean outfall. Proceedings A.S.C.E. March 1960.
33. Torres Salmerón, P.E.: Exploración geofísica del fondo marino. Simposio Internacional de Mecánica de Suelos Marinos. Soc. Mex. de Mec. de Suelos, A.C. México, 1980.
34. U.N.A.M.: Tablas de predicción de mareas. Instituto de Geofísica. 1982.
35. Wiegel, R.L.: Oceanographical Engineering. Prentice-Hall. U.S.A., 1964.
36. Morlett Macho, J.R.: Manual de proyecto y diseño de emisores submarinos. Universidad Iberoamericana. México, 1976.