

8 01162



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO HIDRAULICO DE EMISORES SUBMARINOS

TESIS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Como requisito para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería
(Ingeniería Civil - Hidráulica)

Presenta

GREGORIO POSADA VANEGAS

DIRECTOR DE TESIS

Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN



MÉXICO, D.F.

Agosto 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A mi Mamá, **María Luisa**,
por siempre estar conmigo, apoyarme sin condición
y querer siempre lo mejor para todos.

A mi Papá, **Alcides (Alcho)**,
Por que es mi ejemplo de vida y valores
y amigo fundamental.

A mi Hermana, **Vero**,
Por ser la alegría de la casa y demostrarme siempre
que las cosas, por más difíciles que parezcan
siempre tienen una solución.

A mi novia, **Edith**,
Por su alegría, comprensión
y todo lo que ha sido para mí.

A Dios
por todo lo bueno que nos ha dado
a mi y a mi familia

AGRADECIMIENTOS

Es grato recordar y agradecer a todas los amigos que han estado presente durante estos 2 inolvidables años y han sido apoyo para poder culminar este humilde trabajo, estas líneas para agradecerles por haber siempre estado conmigo.

Gracias a la **Universidad Nacional Autónoma de México**, para que siempre siga brindando la oportunidad de estudiar y formarse a todo aquel que lo necesite.

Gracias al **Instituto de Ingeniería**, por todo el apoyo brindado desde que llegue a México.

Gracias al **Dr. Rodolfo Silva Casarín**, por ser amigo, maestro y formador de personas de ciencia y sobre todo con alto compromiso social

Gracias al **M.en I. Víctor Franco**, por su apoyo incondicional y por siempre haberme hablado con la verdad.

Gracias a mis Maestros **Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida, Dr. Carlos Escalante Sandoval**

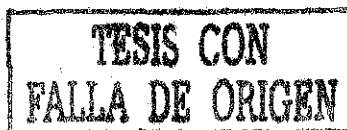
Gracias al **Dr. Gilberto Sotelo Ávila**, por su ejemplo a seguir, por haberme brindado su amistad y ser siempre Maestro.

Un sincero agradecimiento al **Dr Davis Lorin, Dr. Walter Frick y Dr. Philip Roberts**, por su ayuda desinteresada y gran aporte a la realización de esta tesis

Gracias a mis amigos del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, **Berenice, Diana, Dulce, Evelyn, Martha, Megumi, Adrián, Alberto, Edgar, Gabriel, Georges, Gustavo, Juan Carlos, Pablo, Porfirio, Roberto y Rolando** por haber compartido todo su conocimiento y siempre haberme ayudado sin condición y reparo, además, por aguantarme con paciencia durante estos años y participar en las múltiples quinielas

Gracias a mis amigos **César, Juan Ramón, Carlos, Ramiro, Andreas, Cristoph, Alejandro, Santiago, Eduardo, David, María del Carmen, Patricia, María del Carmen (su majestad), Sofía, Alexandra, Arabella, Claudia, Tatiana, Luz Piedad, Yesenia, Ana Cecilia, Edith G, Camila, Alvaro (Parce), Carlos (el viejito), Néstor, Carlos Daniel, Selma, Alvaro, Francisco, Zuny, Marco, Fabián, Sergio, Fernando, Omar, Lilián, Lydia, Franka, Edina, Paula Andrea, Alexandra O, Vicky, Liz, Salvador**, en especial a **Daniel y Ricardo**, por ser todos amigos invaluable, compañeros de rumbas y formar toda esta gran familia que nos permite estar aquí, lejos de nuestra casa y seguir sintiéndonos felices.

A mis Amigos **Sandra, Clara, Adriana, Blanca, Andrea, Gina, Juan Carlos, Gustavo, Ever, Caliche, Nydia, Carlos Rengifo, Carmen, Guillermo, Juan Esteban, Marcela**, por haber siempre estado pendientes de mi y por haber continuado con este gran sueño que tenemos que es ANEIC.



Agradecimientos

A mis Amigos **Catalina Villalba, Catalina Gómez, Andrea, Virginia, José Antonio, Mario y Luis Felipe**, por siempre estar conmigo y saber que la distancia no puede ser un motivo para que se enfríe la amistad.

A mis amigos de la maestría, **Isis, Nikte y Mauricio**, por los momentos de estudio y diversión que hemos tenido. Gracias a mis amigos del Instituto de Ingeniería **Adriana, Alicia, Ismene, Susana, Enedino, Gerón, Martín, Pablo, Paco, Rosa, Rosa E, Tere** por estar siempre conmigo y haberme dado invaluable consejos. A **Joel** por su ayuda

Gracias infinitas a mis Abuelas **Teo e Isabel**, a mis Abuelos **Bernardo y Rafael** (que en paz descansen) por su temple y formación que nos inculcaron a todos los nietos e hijos, a mis Tías **María, Lucía, Yolanda, Cardina, Omaira, Amelia, Isabel, Nora, Olinda**, a mis tíos **Oliverio, Jorge, Rafael, Pacho, Germán**, a mis Primas **Laura, Sara, Nana, Isabel, Jacky, Elsa, Lina, Gines, Cristina, Carolina, Angela, Cristina V.**, a mis Primos **Luis, JuanCa, Juan Fe, JuanDa, Millo, Ale, Pedro, Sebastián, Diego (y Familia), Juante** por siempre estar conmigo y sobre todo por que a pesar de la distancia, hemos seguido siendo familia.

Gracias a la **Familia Arredondo Ortiz, Lili (Lilián), Wilson, y Jhonatan**, por su constancia y por el gran cariño que hay entre nuestras dos familias.

Gracias a la **Familia Ospina Barrios**, por la amistad y apoyo que me han brindado durante todos estos años

Gracias a **Germán, José David, Nolasco, Sonia, Jorge, Magdalena**, por no haberme olvidado.

Gracias a mis profesores de la **Universidad EAFIT, Juan Hernando, Roberto, Darío, Rodrigo, Juan Diego y Gloria**, por la formación y amistad que me han brindado a través de todos estos años.

Gracias a la **Sección Escolar** de la DEPMI, en especial al **Ingeniero José Manuel Soriano**.

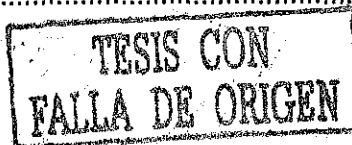
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 SISTEMA DE SANEAMIENTO LITORAL	11
1 SISTEMA DE SANEAMIENTO LITORAL.....	13
1.1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE SANEAMIENTO DE LITORAL.....	13
1.3 ORDENACIÓN DEL LITORAL.....	13
1.3.1 Zonificación de usos.....	13
1.3.2 Recreativos.....	14
1.3.3 Pesca y cultivos marinos.....	14
1.3.4 Conservación de espacios litorales.....	14
1.3.5 Industriales.....	14
1.4 ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS DE CALIDAD.....	15
1.5 DISEÑO AMBIENTAL DE UN SANEAMIENTO LITORAL.....	15
1.5.1 Recopilación de la información.....	17
1.5.1.1 Datos sociológicos.....	17
1.5.1.2 Datos meteorológicos e hidrológicos.....	17
1.5.1.3 Datos físicos, químicos y biológicos.....	17
1.5.1.4 Datos oceanográficos.....	21
1.6 ESTUDIO DE LA RED DE COLECTORES.....	21
1.6.1 Dimensionamiento hidráulico y ambiental.....	21
1.6.2 Planta de tratamiento de aguas residuales en el saneamiento litoral.....	22
1.6.3 Selección del gasto máximo a tratar en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).....	24
1.6.4 Calidad del efluente y nivel de tratamiento en la PTAR.....	24
1.6.5 Diseño del emisor submarino.....	25
1.7 ESTUDIO DEL IMPACTO EN EL LITORAL.....	25
1.8 PLAN DE VIGILANCIA Y CONTROL AMBIENTAL.....	27
1.8.1 Diseño y desarrollo del programa de vigilancia y control ambiental.....	27
1.9 CONCLUSIONES.....	29
CAPÍTULO 2 CONCEPTOS BÁSICOS	31
2 CONCEPTOS BÁSICOS.....	33
2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MEZCLA TURBULENTA.....	33
2.1.1 Arrastre y difusión.....	35

Índice General

2.1.1.1	Arrastre.....	35
2.1.1.2	Difusión.....	35
2.1.2	Zona de desarrollo o crecimiento.....	36
2.1.3	Dilución.....	37
2.1.4	Cantidad de movimiento.....	40
2.2	REGLAMENTACIÓN.....	40
2.3	VARIABLES AMBIENTALES.....	41
2.3.1	Temperatura.....	41
2.3.2	Profundidad.....	43
2.3.3	Salinidad y densidad.....	44
2.3.4	Corrientes y dirección de descarga.....	47
2.3.5	Mareas.....	49
2.4	FLUJO DENTRO DE LA TUBERÍA.....	49
2.5	COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN LOS DIFUSORES.....	49
CAPÍTULO 3 EMISORES.....		51
3	EMISORES.....	53
3.1	CONCEPTOS.....	53
3.1.1	Geometría.....	54
3.2	ECUACIÓN DE ENERGÍA.....	56
3.2.1	Pérdidas de energía en los emisores.....	56
3.2.2	Ecuación de energía entre la tubería y un puerto.....	57
3.2.3	Ecuación de la energía para un segmento de la tubería.....	58
3.2.4	Modelo PLUMEHYD.....	60
3.3	INTERACCIÓN SUELO-TUBERÍA.....	61
3.3.1	Asentamiento de un tubería.....	61
3.3.2	Suelos Friccionantes.....	61
3.3.2.1	Deformación volumétrica del suelo.....	61
3.3.2.2	Método American Gas Association.....	62
3.3.2.3	Método de Verly y Lund.....	63
3.3.2.4	Método Clásico.....	63
3.3.3	Suelos Cohesivos.....	64
3.3.3.1	Método de la Flotación.....	64
3.3.4	Fuerzas de Rotura.....	64
3.4	HIDRODINÁMICA ALREDEDOR DE UNA TUBERÍA.....	65
3.4.1	Formulaciones Matemáticas.....	65
3.4.2	Fuerzas Hidrodinámicas.....	70
3.4.3	Diagrama de Fuerzas Actuantes.....	71
3.4.4	Fuerza Horizontal Instantánea.....	72
3.4.4.1	Fuerza de Arrastre.....	72



Índice General

3.4.4.2	Fuerza de Inercia.....	72
3.4.4.3	Fuerza de Sustentación.....	73
3.4.4.4	Fuerza Normal.....	73
3.4.4.5	Fuerza de Fricción.....	73
3.4.4.6	Valores de los Coeficientes C_D , C_M y C_L	73
3.5	ALINEAMIENTO ÓPTIMO PARA LA MINIMIZACIÓN DE FUERZAS EN EMISORES SUBMARINOS.....	76
3.5.1	Metodología.....	76
CAPÍTULO 4 MODELOS.....		79
4	MODELOS.....	81
4.1	TIPOS DE MODELOS.....	81
4.2	MODELOS LAGRANGIANOS.....	81
4.2.1	Modelo UM3.....	81
4.2.1.1	Teoría.....	81
4.2.1.2	La pluma.....	82
4.2.1.3	Principios de Conservación.....	83
4.2.1.4	Ecuaciones para el Modelo UM.....	84
4.2.1.4.1	Conservación de la masa.....	84
4.2.1.4.2	Conservación de la cantidad de movimiento.....	85
4.2.1.4.3	Conservación de la energía.....	85
4.2.1.4.4	Conservación de sustancias.....	86
4.2.1.5	Procedimiento de cálculo.....	86
4.3	MODELOS EULERIANOS.....	87
4.3.1	Modelo UDKHG.....	88
4.3.1.1	Desarrollo teórico.....	88
4.3.1.1.1	Conservación de la masa.....	88
4.3.1.1.2	Conservación de la energía.....	89
4.3.1.1.3	Conservación de sustancias.....	89
4.3.1.1.4	Conservación de la cantidad de movimiento sobre la trayectoria.....	89
4.3.2	Modelo PDSG.....	89
4.4	MODELOS EMPÍRICOS Y DE LONGITUD DE ESCALA.....	90
4.4.1	Modelo RSB.....	91
4.4.1.1	Esquema del problema.....	91
4.4.1.2	Análisis dimensional.....	93
4.4.1.3	Campo cercano y lejano.....	94
4.4.1.4	Hipótesis básicas y formulación del problema.....	95
4.4.1.5	Análisis de la dilución en la zona cercana.....	95
4.4.1.5.1	Dilución inicial S_1 , ambiente linealmente estratificado.....	96
4.4.1.5.2	Altura de la pluma.....	96
4.4.1.5.3	Longitud del campo cercano.....	97
4.4.1.5.4	Anchura de la pluma.....	97
4.4.1.5.5	Ambiente no estratificado.....	98
4.4.1.6	Análisis de la dilución en la zona lejana, S_2	98

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Índice General

4.4.1.6.1	Modelo de Brooks para la modelación del campo lejano.....	98
4.4.1.7	Dilución efectiva debido al decaimiento de los contaminantes, S_3	101
4.4.2	CORMIX.....	102
4.4.2.1	Longitudes de escala en CORMIX.....	102
4.4.2.2	Clasificación de los flujos según CORMIX.....	104
4.4.2.3	CORJET.....	105
4.5	PRECISIÓN Y RECOMENDACIONES.....	106
4.5.1	Precisión.....	106
4.5.2	Recomendaciones.....	106
4.5.2.1	Rangos de aplicación para los modelos RSB, UM y CORMIX.....	107
4.5.2.1.1	Modelo RSB.....	107
4.5.2.1.2	Recomendaciones de modelos para descargas con un solo puerto.....	108
4.5.2.1.2.1	Columnas de la tabla 4.2.....	109
4.5.2.1.2.2	Filas de la Tabla 4.2.....	110
4.5.2.1.3	Recomendaciones de modelos para descargas con múltiples puertos.....	110
4.5.2.1.4	Recomendaciones de modelos para descargas superficiales.....	111
4.5.2.1.5	Velocidad de análisis.....	111
5	CASOS DE APLICACIÓN	115
5.1	PROGRAMAS Y MODELOS UTILIZADOS.....	115
5.2	DESCARGA DE UN PUERTO.....	115
5.2.1	Datos de difusor.....	115
5.2.2	Ambiente no estratificado.....	116
5.2.2.1	Datos ambientales.....	116
5.2.3	Ambiente estratificado.....	120
5.2.3.1	Datos ambientales.....	120
5.3	DESCARGA CON VARIOS PUERTOS.....	123
5.3.1	Datos del difusor.....	124
5.3.2	Ambiente no estratificado.....	124
5.3.3	Ambiente estratificado.....	128
5.4	CASO REAL.....	130
5.4.1	Descripción del proyecto.....	130
5.4.1.1	Población.....	130
5.4.1.2	Variación en el caudal descargado.....	131
5.4.1.2.1	Gasto de diseño.....	131
5.4.1.2.2	Gasto medio.....	132
5.4.1.2.3	Gasto mínimo.....	132
5.4.1.2.4	Gasto máximo instantáneo.....	132
5.4.1.2.5	Gasto máximo extraordinario.....	133
5.4.1.2.6	Ley de variación horaria.....	133
5.4.1.3	Variación en la densidad del agua.....	134
5.4.1.4	Oleaje.....	134
5.4.1.5	Fuerzas.....	135
5.4.1.6	Definición de zonas.....	136
5.4.1.7	Cálculo hidráulico para el difusor y los puertos.....	136

Índice General

5.4.1.8	Planta de tratamiento.....	137
5.4.1.9	Geometría del difusor.....	138
5.4.1.10	Datos varios.....	138
5.4.2	Modelación para el invierno.....	139
5.4.2.1	Modelo UM3.....	139
5.4.2.2	Modelos DKW.....	139
5.4.2.3	CORMIX.....	140
5.4.3	Modelación para el verano.....	141
5.4.3.1	Modelo UM3.....	141
5.4.3.2	Modelo DKHW.....	142
5.4.3.3	CORMIX.....	143
CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....		147
CONCLUSIONES.....		149
FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....		149
ANEXO A MODELOS.....		159
A	ANEXO 1.....	161
A.1	Modelo UM3.....	161
A.1.1	Desarrollo matemático.....	161
A.1.1.1	Conservación de la masa.....	162
A.1.1.2	Conservación de la cantidad de movimiento.....	166
A.1.1.3	Conservación de la energía.....	166
A.1.1.4	Conservación de sustancias.....	167
A.1.2	Condiciones de frontera.....	167
A.1.2.1	Traslape.....	168
A.1.2.2	Combinación de plumas.....	168
A.2	Modelos Eulerianos.....	170
A.2.1	Modelos DKHG.....	170
A.2.1.1	Desarrollo teórico.....	170
A.2.1.2	Conservación de la masa.....	170
A.2.1.3	Conservación de la energía.....	171
A.2.1.4	Conservación de sustancias.....	171
A.2.1.5	Conservación de la cantidad de movimiento sobre la trayectoria.....	171
A.2.2	Modelo PDSG.....	173
A.2.2.1	Desarrollo teórico.....	174
A.3	Modelos empíricos y de longitud de escala.....	180
A.3.1	Ambiente no estratificado.....	180
A.3.1.1	Dilución inicial.....	180
A.3.1.2	Longitud de campo cercano.....	180
A.3.1.3	Anchura de la pluma.....	181
A.3.1.4	Análisis de la dilución en la zona lejana, S_2	181
A.3.1.4.1	Ley de Richardson.....	181

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

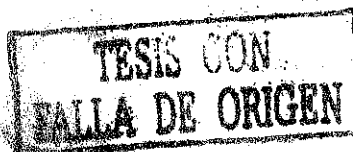
LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área de la sección transversal de un puerto (m^2)
a_x	Aceleración en la dirección X (m^2/s)
a_z	Aceleración en la dirección Z (m^2/s)
A_p	Área proyectada (m^2)
A_T	Área de la sección de la pluma en contacto con el ambiente
A	Área de la sección transversal de un difusor (m^2)
A_S	Área de la sección transversal que penetra en el suelo (m^2)
b	Radio de la pluma (m)
b	Flotabilidad por unidad de longitud (m^3/s^3)
B	Longitud transversal para el enterramiento (m)
C	Celeridad (m/s)
C_a	Concentración del contaminante en el medio receptor (ppm, mg/l, ...)
C_p	Calor específico a una presión constante
C_D	Coefficiente de arrastre
C_j	Concentración de contaminantes
C_L	Coefficiente de sustentación
C_M	Coefficiente de inercia
C_g	Celeridad de grupo (m/s)
C_o	Concentración del contaminante en la descarga (ppm, mg/l, ...)
C_j'	Coefficiente de contracción
\dot{C}	Flujo medio de la concentración a través de todo la pluma
D	Diámetro exterior de la tubería (m)
D_i	Coefficiente de difusión del contaminante i .
D_0	Diámetro de los puertos de descarga (m)
E	Arrastre total del fluido
E_{amb}	Arrastre debido a las corrientes
E_a	Arrastre debido a la aspiración tipo Taylor
f_f	Factor de fricción de Darcy-Weisbach
f_i	Vector de flujo de presión
F	Flujo de energía (kg/s)
F	Número de Froude de Roberts
F_C	Fuerza vertical (Kn/m)
$F_{a,max}$	Máxima fuerza de rompimiento en la dirección axial (kg)
$F_{l,max}$	Máxima fuerza de rompimiento en la dirección lateral (kg)
F_D	Fuerza de arrastre (kg/m)
F_L	Fuerza de sustentación (kg/m)
F_M	Fuerza de inercia (kg/m)
F_o	Número de Froude densimétrico
F_R	Fuerza de fricción (kg/m)
g	Aceleración de la gravedad (m^2/s)
g	Aceleración de la gravedad modificada (m^2/s)
h	carga de posición (m)
h	profundidad (m)
H	Altura de ola (m)
I_A	Radiación solar media diaria en la superficie (langleys/hr, cal/cm ² /hr)
k	Coefficiente de perdidas menores
k	Coefficiente de decaimiento de primer orden

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Indice General

<i>KC</i>	<i>Número de Keulegan-Carpenter</i>
<i>k_e</i>	<i>Coefficiente de extinción solar (0.16m⁻¹)</i>
<i>L</i>	<i>longitud de un segmento de la tubería (m)</i>
<i>L</i>	<i>Longitud de ola (m)</i>
<i>L</i>	<i>Longitud del difusor (m)</i>
<i>m</i>	<i>masa (kg)</i>
<i>m</i>	<i>Cantidad de movimiento (m³/s²)</i>
<i>n</i>	<i>Coefficiente de rugosidad de Manning.</i>
<i>N</i>	<i>Fuerza normal (kg/m)</i>
<i>N</i>	<i>Frecuencia de flotación ó gradiente de densidad ambiental (1/s)</i>
<i>N_c</i>	<i>Factor de capacidad de carga para la cohesión</i>
<i>N_q</i>	<i>Factor de capacidad de carga para la fricción x</i>
<i>N_y</i>	<i>Factor de capacidad de carga para el enterramiento</i>
<i>O</i>	<i>Flotación (kg)</i>
<i>p</i>	<i>Carga de presión en un punto determinado de una tubería (kg/m²)</i>
<i>q</i>	<i>caudal por unidad de longitud (m³/s)</i>
<i>q_f</i>	<i>capacidad de carga de un suelo (kg/m²)</i>
<i>Q_o</i>	<i>Descarga del difusor (m³/s)</i>
<i>r</i>	<i>Radio parcial de la pluma (m)</i>
<i>r'</i>	<i>Radio total de la pluma (m)</i>
<i>R</i>	<i>Número de Reynolds</i>
<i>R_i</i>	<i>Número de Richardson</i>
<i>s_v</i>	<i>Esfuerzo cortante sin drenar (kPa)</i>
<i>S</i>	<i>Dilución total de un contaminante</i>
<i>S_m</i>	<i>Dilución mínima</i>
<i>S₁</i>	<i>Dilución inicial</i>
<i>S₂</i>	<i>Disolución debida a la dispersión</i>
<i>S₃</i>	<i>Dilución efectiva debida al decaimiento de las bacterias coliformes</i>
<i>t</i>	<i>Tiempo (s)</i>
<i>T</i>	<i>Periodo de una ola (s)</i>
<i>T</i>	<i>Temperatura media (°C)</i>
<i>T_a</i>	<i>Temperatura ambiental (°C)</i>
<i>T_{ref}</i>	<i>Temperatura de referencia (°C)</i>
<i>T₉₀</i>	<i>Tiempo requerido por el contaminante para reducirse al 90% del valor inicial (s)</i>
<i>u</i>	<i>Velocidad del efluente en la posición r (m/s)</i>
<i>u</i>	<i>velocidad en la dirección X (m/s)</i>
<i>u_{cl}</i>	<i>Velocidad en el centro de la pluma</i>
<i>U_o</i>	<i>Velocidad de descarga a través de los puertos de un difusor (m/s)</i>
<i>U_o</i>	<i>Velocidad de la corriente (m/s)</i>
<i>V</i>	<i>Velocidad en el interior de una tubería (m/s)</i>
<i>w</i>	<i>Velocidad en la dirección Z (m/s)</i>
<i>W</i>	<i>Peso sumergido de la tubería y peso del contenido de esta (kg)</i>
<i>w_o</i>	<i>Ancho de la pluma al final del campo cercano (m)</i>
<i>X_i</i>	<i>Longitud del campo cercano (m)</i>
<i>z</i>	<i>Penetración en el suelo (m)</i>
<i>z_e</i>	<i>Altura que alcanza la pluma (m)</i>
<i>ΔH</i>	<i>Asentamiento total de una tubería (m)</i>
<i>ΔH_E</i>	<i>Asentamiento elástico de una tubería (m)</i>
<i>ΔH_P</i>	<i>Asentamiento por consolidación primaria de una tubería (m)</i>
<i>ΔH_S</i>	<i>Asentamiento por consolidación secundaria de una tubería (m)</i>
<i>α</i>	<i>Relación de corrientes</i>



Indice General

α	<i>Función de arrastre (0.1)</i>
β	<i>Alineamiento de la tubería</i>
ϵ	<i>Promedio de las rugosidades relativas</i>
ε	<i>Coefficiente de difusión</i>
ϕ	<i>ángulo de fricción interna (°)</i>
γ	<i>Peso específico del agua (kg/m³)</i>
γ_0	<i>Ángulo inicial de descarga (°)</i>
γ_s	<i>Peso específico del suelo (kg/m³)</i>
ρ	<i>Densidad del agua de mar (kg*s²/m⁴)</i>
μ	<i>Coefficiente de fricción entre la tubería y el suelo del mar</i>
ν	<i>viscosidad cinemática (m²/s)</i>
σ	<i>Densidad según la ecuación (2.13)</i>
σ	<i>Ángulo entre la corriente y el eje de los puertos (°)</i>
ξ	<i>Desplazamiento vertical (m)</i>
ξ	<i>Desplazamiento Horizontal (m)</i>
\hat{e}_1	<i>Vector unitario en la dirección de la trayectoria</i>
\hat{e}_2	<i>Vector unitario en la dirección normal horizontal a la trayectoria</i>
\hat{e}_3	<i>Vector unitario en un plano vertical al formado por los vectores \hat{e}_1 y \hat{e}_2</i>
$\sum F_h$	<i>Fuerza total horizontal (kg)</i>
$\sum F_v$	<i>Fuerza total vertical (kg)</i>
$\sum R$	<i>Fuerza total (kg)</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ordenamiento ecológico de la laguna de Nichupté, Cancún Quintana Roo http://www.semarnap.gob.mx/naturaleza/regiones/nichupte/mp-nichupte.htm	15
Figura 1.2. Diagrama de las fases de un sistema de saneamiento	16
Figura 1.3. Ejemplo de una rosa de viento	21
Figura 1.4. Tratamiento de una planta convencional de agua residual doméstica	23
Figura 1.5. Tipos de tratamiento primario, adaptado Jiménez (2001)	24
Figura 1.6. Vista esquemática de un emisor submarino y difusores, Boston (Massachussets Water Resources Authority –MWRA-, 2000)	25
Figura 1.7. Diagrama de flujo para el estudio de los efectos de los vertidos continuos y esporádicos de un saneamiento.	26
Figura 1.8. Esquema metodológico aplicable al desarrollo del plan de vigilancia y control ambiental.	28
Figura 2.1. Esquema típico de un difusor submarino enterrado	33
Figura 2.2. Pluma producida por una descarga submarina	34
Figura 2.3. Chorro producido por una descarga submarina	34
Figura 2.4. Perfiles en la zona de desarrollo	36
Figura 2.5. Perfiles Gaussiano y elevado a la 3/2.	37
Figura 2.6. Esquema de las zonas de concentración.....	40
Figura 2.7 Patrón de temperatura superficial del golfo de México durante el invierno: (a) registros isotermales (Nowlin y McLellan, 1967), (b) datos de imagen de satélite (Secretaría de Marina, 1985).....	42
Figura 2.8 Patrón de temperatura superficial del golfo de México durante el verano: (a) datos de imagen de satélite (Secretaría de Marina, 1985), (b) Isotermas de la zona sur (Vázquez de la Cerde, 1979)	42
Figura 2.9. Descarga en aguas profundas con esparcimiento en la superficie	43
Figura 2.10. Descarga en aguas someras con campo de flujo inestable	44
Figura 2.11. Descarga en aguas someras con.....	44
Figura 2.12. Variación de la densidad con respecto a la salinidad y la temperatura	45
Figura 2.13. Pluma atrapada debido a la estratificación de la densidad.....	46
Figura 2.14 Variación de la temperatura, la salinidad y la densidad para el invierno (Lavin et al, 1999).....	47
Figura 2.15 Variación de la temperatura, la salinidad y la densidad para el verano (Lavin et al, 1999).....	47
Figura 2.16. Comportamientos posibles para descargas verticales,	48
Figura 2.17. Comportamientos posibles para descargas horizontales,	48
Figura 2.18. Descarga de un difusor con corriente paralela.....	48
Figura 3.1. Comportamiento típico de una descarga en un difusor con múltiples puertos	53
Figura 3.2. Difusor con puertos en forma de boquilla	54
Figura 3.3. Difusor con puertos en forma de ductos ascendentes.....	54
Figura 3.4. Difusor con múltiples puertos de salida por ducto ascendente.....	55
Figura 3.5. Diferentes arreglos de difusores	56
Figura 3.6. Esquema para la definición	57
Figura 3.7. Parámetros para la ecuación (3.20)	62
Figura 3.8. Fuerza Horizontal vs. desplazamiento lateral	65
Figura 3.9. Variables usadas para la teoría lineal	66
Figura 3.10. Campo de velocidades alrededor de una tubería	71
Figura 3.11. Diagrama de Fuerzas actuantes en una tubería.....	71
Figura 3.12. Valores del Coeficiente de Sustentación	75
Figura 3.13. Definición de variables alineamiento óptimo (perfil).....	77
Figura 3.14. Definición de variables alineamiento óptimo (planta).....	77

Indice General

Figura 4.1. Esquema para el análisis con el modelo lagrangiano UM	82
Figura 4.2. Tipos de arrastre considerados en la ecuación (4.1)	84
Figura 4.3. Definición de coordenadas para una pluma tridimensional.....	88
Figura 4.4. Gráfica en la cual se indican como los parámetros adimensionales son utilizados para determinar las ecuaciones empíricas	90
Figura 4.5. Definición de variables propuesta por Roberts et al (1989).....	91
Figura 4.6. Definición de variables propuesta por Roberts et al (1989).....	92
Figura 4.7. Zonas en las que se divide la pluma	94
Figura 4.8. Variables para el modelo de Brooks, (1959).....	99
Figura 4.9. Predicción Numérica de la dilución (Wright et al 1982) y parámetros utilizados y rango de aplicación para Roberts et al 1989 a, b y c.....	108
Figura 5.1. Comportamiento en perfil para descarga de un solo puerto no estratificada.....	116
Figura 5.2 Comportamiento en perfil con el programa CORMIX	117
Figura 5.3. Comportamiento en planta para una descarga de un solo puerto no estratificada.....	117
Figura 5.4 Comportamiento en planta con el modelo CORMIX.....	118
Figura 5.5. Densidad vs. profundidad para una descarga de un solo puerto no estratificada	118
Figura 5.6. Dilución vs. distancia horizontal para una descarga de un solo puerto no estratificada..	119
Figura 5.7 Dilución predicha por CORMIX	119
Figura 5.8. Comportamiento en perfil para descarga de un solo puerto estratificada.	121
Figura 5.9 Comportamiento en perfil con ambiente estratificado.....	121
Figura 5.10. Comportamiento en planta para una descarga de un solo puerto estratificada.....	121
Figura 5.11. Densidad vs. Profundidad para una descarga de un solo puerto estratificada.	122
Figura 5.12. Dilución vs. distancia horizontal para una descarga de un solo puerto estratificada....	123
Figura 5.13 Dilución predicha por CORMIX para ambiente estratificado.....	123
Figura 5.14. Comportamiento en perfil para descarga de 10 puertos no estratificada.	124
Figura 5.15 Comportamiento en perfil para múltiples puertos.....	125
Figura 5.16. Comportamiento en planta para descarga de 10 puertos no estratificada.....	125
Figura 5.17. Densidad vs. profundidad para una descarga de 10 puertos no estratificada	126
Figura 5.18. Dilución vs. distancia horizontal para una descarga de 10 puertos no estratificada	127
Figura 5.19 Dilución para ambiente no estratificado y múltiples puertos.....	127
Figura 5.20. Comportamiento en perfil para descarga de 10 puertos estratificada	128
Figura 5.21 Comportamiento en perfil para múltiples puertos y ambiente estratificado	129
Figura 5.22. Densidad vs. profundidad para una descarga de 10 puertos no estratificada	129
Figura 5.23. Dilución vs. distancia horizontal para una descarga de 10 puertos estratificada	129
Figura 5.24 Dilución para ambiente estratificado con múltiples puertos	130
Figura 5.25 Perfil de Velocidades para el invierno.....	134
Figura 5.26 Perfil de velocidades para el verano.....	135
Figura 5.27 Fuerzas actuantes sobre la tubería en el invierno.....	135
Figura 5.28 Fuerzas actuantes sobre la tubería en el verano.	136
Figura 5.29 No Froude vs Puerto para el difusor de Veracruz	137
Figura 5.30 Velocidad entre puertos vs Puerto para el difusor de Veracruz	138
Figura 5.31 Método de colocación para la tubería.....	138
Figura 5.32 Comportamiento en perfil para la pluma en el invierno.....	140
Figura 5.33 Variación de la dilución en función del caudal durante el invierno.....	141
Figura 5.34 Comportamiento en perfil para la pluma en el verano	143
Figura 5.35 Variación de la dilución en función del caudal durante el verano.	144
Figura 5.36 Variación del nivel de atrapamiento en función del caudal durante el verano.....	145
Figura A.1. Convergencia de las caras del elemento debido a la diferencia de velocidades	162
Figura A.2. Tipos de arrastre considerados en la ecuación (4.1)	163
Figura A.3. Sistema local de coordenadas.....	164
Figura A.4. Componentes del área proyectada.	164

Indice General

Figura A.5. Diferentes grados de curvatura para el elemento de la pluma.....	165
Figura A.6. Rebanada traslapada, considerada en el modelo UM.....	168
Figura A.7. Plumas combinadas y planos de reflexión	169
Figura A.8. Definición de coordenadas para una pluma tridimensional.....	170
Figura A.9. Sección transversal de las plumas combinadas	172
Figura A.10. Distribución de la concentración	173
Figura A.11. Esquema de la pluma superficial descrita	174

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Objetivos de calidad asociados a determinados usos del litoral	15
Tabla 1.2.	Parámetros según el Concilio Europeo de las Comunidades para uso de litoral recreativo	18
Tabla 1.3.	Parámetros según el Concilio Europeo de las Comunidades para Uso de Litoral de pesca y cultivos marinos	19
Tabla 1.4.	Límites máximos permisibles para contaminantes básicos, metales pesados y cianuros...	20
Tabla 1.5	Dotaciones para el diseño de acueductos, IMTA, 1995.....	22
Tabla 1.6.	Niveles de tratamiento	23
Tabla 1.7.	Características de calidad del agua residual en poblaciones mexicanas mayores de 10000 habitantes.....	25
Tabla 2.1.	Valores máximos y mínimos para el coeficiente de rugosidad de Manning.....	49
Tabla 3.1.	Resumen de las características del oleaje en aguas poco profundas ($kh < \pi/10$).....	67
Tabla 3.2.	Resumen de las características del oleaje en aguas profundas ($kh > \pi$).....	68
Tabla 3.3.	Resumen de las características del oleaje en aguas intermedias ($\pi/10 < kh < \pi$)	69
Tabla 3.4.	Resumen de las características del oleaje en aguas intermedias para oleaje con corriente ($\pi/10 < kh < \pi$).....	70
Tabla 3.5.	Coefficientes C_M , C_D , y C_L en función de KC y e/D , Aguilar (1999).....	74
Tabla 3.6.	Valores máximos y mínimos de los Coeficientes C_M , C_D , y C_L	75
Tabla 4.1.	Parámetros y espaciamiento de los puertos para estudio de Roberts et al 1989 a, b y c.	108
Tabla 4.2.	Recomendaciones para descargas de un solo puerto, Baumgartner et al 1994	109
Tabla 4.3.	Recomendaciones para descargas de un solo puerto, Baumgartner et al 1994	110
Tabla 5.1.	Datos del difusor	115
Tabla 5.2.	Datos ambientales	116
Tabla 5.3.	Datos ambientales	120
Tabla 5.4.	Datos del difusor	124
Tabla 5.5	Poblaciones para la Ciudad de Veracruz, INEGI	130
Tabla 5.6	Tasas de crecimiento para la ciudad de Veracruz.....	131
Tabla 5.7.	Variación horaria del caudal.....	134
Tabla 5.8	Variación de la densidad para el verano.....	134
Tabla 5.9	Oleaje para el puerto de Veracruz	134
Tabla 5.10	Datos de diseño para el emisor submarino	136
Tabla 5.11	Características del agua residual a través de los puertos	137
Tabla 5.12	Dilución para la zona de mezclado en invierno con el modelo UM3	139
Tabla 5.13	Dilución para la zona de mezclado con el modelo DKHG.....	140
Tabla 5.14	Dilución a 100 metros con CORMIX	140
Tabla 5.15	Dilución en verano con el modelo UM3	142
Tabla 5.16	Dilución para el verano con el modelo DKHW	143
Tabla 5.17	Dilución para el verano con CORMIX.....	144

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Frecuentemente, las aguas residuales son descargadas dentro de las aguas costeras a través de largos emisores submarinos que terminan en un difusor, estos emisores submarinos maximizan la dilución de la descarga de agua residual en la vecindad del difusor. En América Latina esta forma de disponer el agua residual es poco utilizada, solo en algunas grandes ciudades costeras se realiza la disposición de esta manera, debido tanto a dificultades económicas y técnicas como a la falta de visión de la clase dirigente que no comprende que el adecuado tratamiento de las aguas residuales es fundamental para el desarrollo de una sociedad equitativa.

El objetivo principal que se busca alcanzar con la construcción de un emisor submarino es proveer de los elementos técnicos necesarios para que los efectos que se causen en el agua que recibe al efluente residual proveniente de la planta de tratamiento sean mínimos. Para esto, se requiere que las concentraciones de bacterias, elementos tóxicos y otros contaminantes sean reducidos hasta alcanzar niveles seguros; que las concentraciones de oxígeno disuelto en el ecosistema siempre sean superiores a los niveles mínimos permitidos y que la depositación local de las partículas provenientes del agua residual no sea excesiva.

Para el funcionamiento adecuado de un emisor submarino es fundamental pensar en una planta de tratamiento de aguas residuales, que pueda recoger las aguas residuales y garantizar unos parámetros físicos y químicos en el efluente que será depositado en el mar, sin la planta no habría un punto de partida de la tubería y suponiendo que esta no se construyera, la tubería se taponaría rápidamente como consecuencia de la deposición de los sólidos en suspensión que tienen las aguas residuales.

La mayoría de las plantas de tratamiento en las ciudades costeras solo incluyen tratamiento primario, este contiene sistemas de filtros para partículas gruesas, por lo cual sólo algunos sólidos pueden ser removidos antes de que el agua sea descargada al mar. Esto conlleva a que el agua pueda tener elementos pesados, como plomo, cadmio, y mercurio, los cuales se encuentran fácilmente en la naturaleza, en pequeñas cantidades, pero que las aguas residuales de las industrias y algunos municipios pueden contener en grandes cantidades, lo cual puede ser muy tóxico, tanto para el ser humano como para el medio ambiente, es por esto que las predicciones para la dilución inicial en el campo cercano y el transporte del efluente por las corrientes y el oleaje en el campo lejano son requeridas para salvaguardar la salud pública y hacer una administración adecuada de los recursos costeros.

Si los difusores del emisor causan una rápida dilución y dispersión del efluente, además de que la localización de todo el sistema este lo mas lejos posible de las áreas críticas, por ejemplo la playa, con un nivel de tratamiento primario en la planta de tratamiento se alcanzan los objetivos de depositación, mantenimiento del nivel de oxígeno y cumplimiento de los niveles de bacterias y toxicidad anteriormente mencionados

Después de la mezcla inicial y debido principalmente a que el mecanismo de entrada del efluente dentro del mar es turbulento, lo que se conoce como campo cercano, se inicia el campo lejano, en donde el efluente es dispersado tanto por la turbulencia en el ambiente como por las corrientes propias del lugar de disposición. Los procesos que contribuyen a la subsiguiente dispersión de la pluma de agua residual están asociados a una componente advectiva y a otra componente de difusión.

Descripción y organización de la Tesis

Con la finalidad de dar claridad al presente trabajo, los temas de estudio se repartieron en los siguientes capítulos.

Capítulo 1 Sistema de saneamiento litoral

Se enuncian los criterios básicos que se deben tener en cuenta para diseñar un sistema integral de saneamiento litoral, el cual debe entenderse como único para cada población. Se indican los componentes básicos del sistema de saneamiento litoral, del cual el emisor submarino es un componente, que si se diseña de manera deficiente conlleva a la falla del sistema, además se enuncian los criterios físicos, biológicos y químicos que debe cumplir el agua residual.

Capítulo 2 Conceptos básicos

Se presentan las características físicas de la mezcla turbulenta, los fenómenos físicos que hacen parte de esta, la reglamentación en cuanto a la definición de zonas exclusivas para las concentraciones de contaminantes, las variables ambientales que es necesario cuantificar para un diseño adecuado de un difusor submarino y una explicación del flujo dentro de un difusor submarino

Capítulo 3 Difusores submarinos

Se indican los conceptos básicos de un emisor submarino, sus componentes, las ecuaciones utilizadas para el cálculo del flujo dentro de este, al igual que las expresiones para el calculo de los asentamientos en función del tipo de suelo donde se construye, también se presentan las ecuaciones hidrodinámicas que sirven para caracterizar el flujo alrededor de la tubería, finalmente se presenta una metodología para la definición del alineamiento óptimo de la tubería

Capítulo 4 Modelos

Se describen los modelos presentes en la literatura actual que sirven para definir el comportamiento del efluente una vez este sale del difusor y entra en el océano, al final se dan las recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de elegir un determinado modelo para un diseño específico

Capítulo 5 Caso de aplicación

Se realiza el diseño de un emisor para el puerto de Veracruz, en el cual se aplican todos los conceptos descritos anteriormente, adicionalmente se presentan 2 casos sencillos para comprender la manera como el efluente se comporta en el océano, una vez que es descargado en éste

Anexo 1 Desarrollo matemático

Se describe los modelos matemáticos presentados en el capítulo 4.

Conclusiones

Se enuncian las conclusiones obtenidas por el desarrollo de este trabajo.

Futuras líneas de Investigación

Se en listan los campos de la investigación que se abren una vez concluido este trabajo.

CAPÍTULO 1 SISTEMA DE SANEAMIENTO LITORAL

1 SISTEMA DE SANEAMIENTO LITORAL

1.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de un emisor submarino no puede entenderse como una acción aislada que por sí sola garantice que la disposición de las aguas residuales en el océano se realice de la manera más adecuada, el emisor submarino es parte del sistema de saneamiento litoral.

En este capítulo se enuncian los criterios básicos para diseñar un sistema integral de saneamiento litoral, el cual debe entenderse como único para cada población. En ningún caso puede hablarse de un sistema de saneamiento típico, que pueda aplicarse satisfactoriamente en cualquier lugar obteniéndose los mismos resultados

1.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE SANEAMIENTO DE LITORAL

Un sistema de saneamiento litoral está compuesto por:

- Ordenación del litoral
- Diseño ambiental del sistema de saneamiento
 - Alcantarillado pluvial
 - Alcantarillado de aguas residuales
 - Planta de tratamiento de aguas residuales
 - Emisor y difusores submarinos
- Programa de vigilancia y control ambiental

El diseño de sistema de saneamiento debe partir de la capacidad de admisión de vertidos del medio receptor y continuar este hacia aguas arriba para el diseño de cualquiera de los elementos que lo constituyen.

Una vez establecidas las condiciones que indican los niveles de calidad requeridos para el área bajo la influencia del sistema de saneamiento, es decir, definidos los efectos máximos que se pueden permitir en cada zona del litoral, el siguiente paso consiste en diseñar los elementos físicos del sistema de saneamiento litoral.

1.3 ORDENACIÓN DEL LITORAL

1.3.1 Zonificación de usos

De manera general, se pueden clasificar cuatro tipos de usos de los espacios litorales que a continuación se describen, los cuales servirán de guía para la definición de los usos particulares de cada área considerada:

1.3.2 Recreativos

Dentro de esta clasificación se incluyen las zonas de litoral donde se realizan actividades que implican la utilización directa o indirecta de los cuerpos de agua, ya sea natación, esquí náutico, buceo, canotaje y que no tengan riesgo de enfermarse por causa de las sustancias orgánicas e inorgánicas que pueda tener el agua.

1.3.3 Pesca y cultivos marinos

Dentro de este grupo se engloban las actividades relacionadas con:

- La extracción comercial de recursos pelágicos y bentónicos renovables (pesca comercial y de mariscos), para consumo humano
- El mantenimiento, reproducción y cría de especies marinas en instalaciones artificiales, que utilicen el espacio litoral como zona de abastecimiento de agua, o en espacios litorales autorizados.

1.3.4 Conservación de espacios litorales

Este uso genérico se refiere al mantenimiento de los valores estéticos, ecológicos, culturales, educativos, o científicos propios de un espacio litoral. Este uso, afecta a toda la gama de ecosistemas acuáticos de una región, cuyo límite con el medio continental está impuesto por el área de influencia de la marea; esto implicará que las características hidrodinámicas, biológicas, ecológicas, etc., para cada una de estas regiones sean diferentes, por esto, la aplicación de este uso, es genérico ya que no se puede particularizar en un determinado tipo de ecosistema acuático, porque se correría el riesgo de excluir algún espacio litoral indiscriminadamente.

1.3.5 Industriales

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

Como ejemplo se puede ver el caso de Cancún Quintana Roo; para el ordenamiento de Cancún se han considerado los siguientes usos mostrados en la *Figura 1.1*.



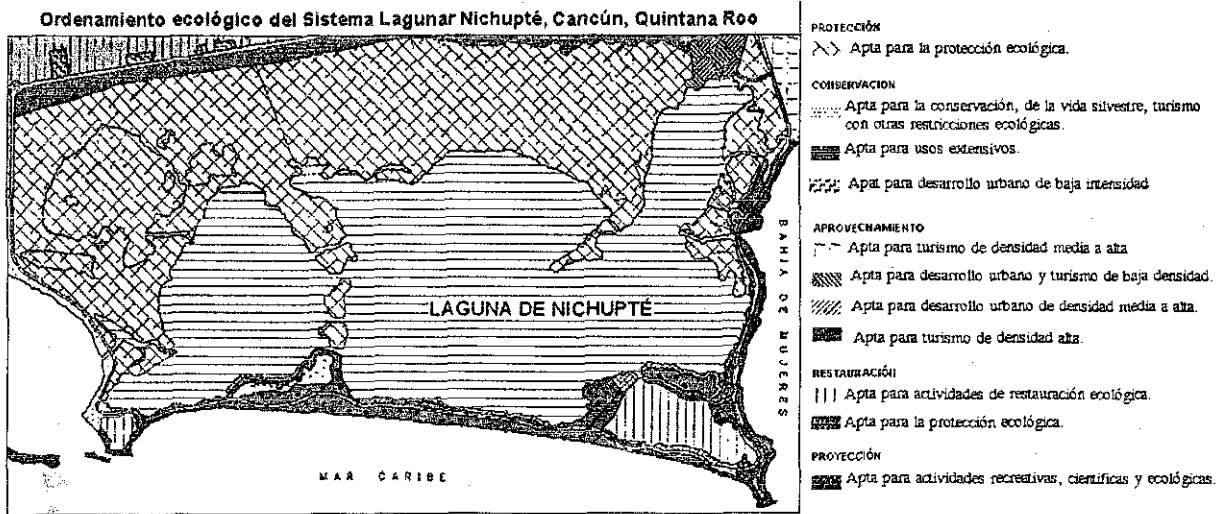


Figura 1.1 Ordenamiento ecológico de la laguna de Nichupté, Cancún Quintana Roo
<http://www.semarnap.gob.mx/naturaleza/regiones/nichupte/mp-nichupte.htm>

1.4 ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS DE CALIDAD

Una vez definidos los usos que se le darán a cada zona del litoral, se establecen los objetivos de calidad asociados a cada una de las zonas delimitadas en la zonificación. En la *Tabla 1.1* se especifican algunos de los posibles objetivos para cada tipo de uso genérico.

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

Tabla 1.1 Objetivos de calidad asociados a determinados usos del litoral

1.5 DISEÑO AMBIENTAL DE UN SANEAMIENTO LITORAL

Desde un punto de vista metodológico, el diseño de un sistema de saneamiento litoral implica el desarrollo de las etapas que se señalan en el diagrama de flujo de la *Figura 1.2*

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

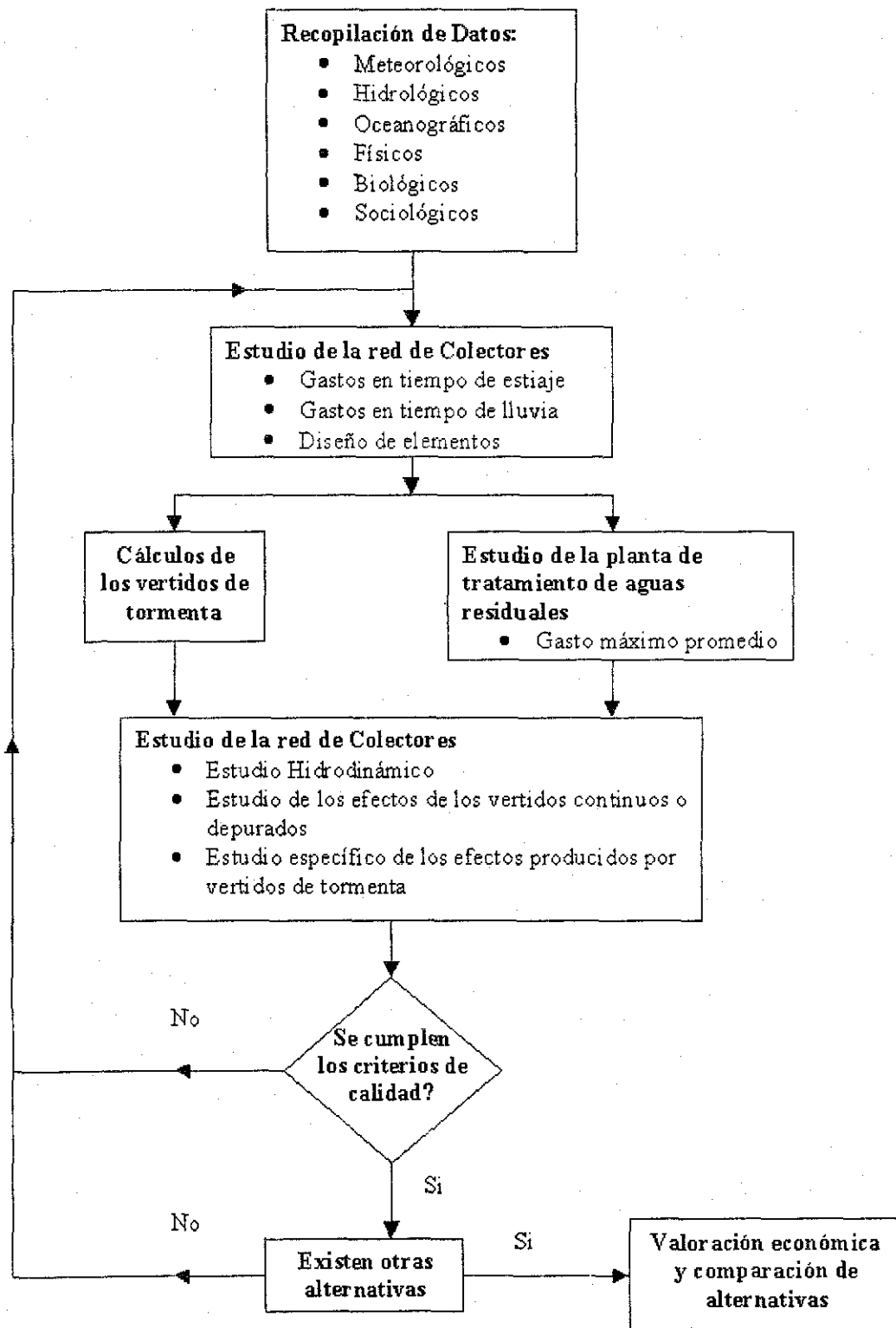


Figura 1.2. Diagrama de las fases de un sistema de saneamiento

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1.5.1 Recopilación de la información

Normalmente, el estudio de los posibles escenarios, que se comparan con el escenario real, se realiza con la ayuda de modelos matemáticos, para lo cual es necesario contar con una base de datos adecuada que cumpla una doble función: la calibración de los modelos y la aplicación de los mismos para la solución de los problemas.

Los datos para la calibración se obtienen de campañas realizadas en zonas y lugares concretos, así como de las bases de datos históricas disponibles para el lugar de aplicación. El conjunto de datos necesarios se engloba dentro de alguna de las siguientes categorías:

1.5.1.1 Datos sociológicos

Estos datos se refieren a la población actual, su evolución y su variación estacional, así como los datos necesarios (industria, instalaciones públicas, etc.) para la estimación de los gastos y cargas contaminantes de estiaje.

1.5.1.2 Datos meteorológicos e hidrológicos.

Se clasifican aquí, los datos que son necesarios para la estimación de gastos del agua captada en la cuenca que vierten directamente a los medios receptores, en los que se introduce la contaminación denominada "difusa" por no proceder de una fuente concreta, y los que son recogidos por la red de saneamiento que condicionará el diseño de diferentes elementos de la red.

1.5.1.3 Datos físicos, químicos y biológicos

Son los datos con los que se representan las características físicas (temperatura, densidad, turbidez, color), químicas (PH, metales pesados, como son arsénico, cadmio, plomo, mercurio, cromo, fenoles, minerales, pesticida) y biológicas (coliformes fecales y totales, salmonella, enterovirus) de las aguas catalogadas en un uso de litoral específico.

Para los usos de litoral recreativo y pesca y cultivos marinos los parámetros según el Concilio Europeo de las Comunidades (CEC 1976b) son los indicados en la *Tabla 1.2* y *Tabla 1.3*, respectivamente:

	Parámetro	Recomendado 90% a menos que se indique diferente	Obligatorio 95% a menos que se indique diferente	Frecuencia mínima de muestreo	Método de análisis e inspección
1	Microbiológico Coliformes totales/100 ml	500 (80%)	10,000	2 semanas	Fermentación en múltiples tubos
2	Coliformes fecales/100 ml	100 (80%)	2,000	2 semanas	
3	Estreptococcus Fecales/100 ml	100	-		Método de Litsky
4	Salmonella/1 lt	-	0		Membrana de

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

					Filtración
5	Enterovirus (PFU/10 lt)	-	0		Concentración por filtración, floculación o centrifugación y confirmación
6	PH	-	6 a 9		Electrometría con calibración a PH 7 y 9
7	Color	-	No anormal	2 semanas	Inspección visual o fotometría con comparación a la escala PtCo
8	Aceites minerales mg/lt	-	No visibles en la superficie y no olor	2 semanas	Visual e inspección olfatoria o extracción usando un volumen adecuado y pesando el residuo seco
9	Fenoles mg/l C4H5Oh	<0.005	< 0.05	2 semanas	Verificación de ausencia de olor debido a la presencia de los fenoles
10	Transparencia m	2	1	2 semanas	Disco de Secchi
11	Oxígeno disuelto porcentaje de saturación	80 a 120	-		Método de Winkler o Método electrométrico
12	Materiales flotantes (madera, plástico, vidrio...)	Ausencia			Inspección visual o fotometría con comparación a la escala PtCo
13	Amoniaco mg/l NH4				Método de Nessler o Absorción espectrofotométrica
14	Nitrogeno de Kjeldahn (ml/ l N)				Método de Kjeldahn
15	Pesticidas	la concentración debe ser comprobada cuando la inspección indica que la sustancia puede estar presente o la calidad del agua se ha deteriorado			Extracción con solventes apropiados y determinación cromatográfica
16	Métales pesados (Arsenico, Cadmio, Cromo, plomo, mercurio)				Absorción atómica posiblemente precedida de extracción
17	Cinamidas (mg/l)				Absorción espectroscopia usando un reagente específico
18	Nitratos y Fosfatos mg/lt)				Absorción espectroscopia usando un reagente específico

Tabla 1.2. Parámetros según el Concilio Europeo de las Comunidades para uso de litoral recreativo

	Parámetro	Recomendado 75% a menos que se indique diferente	Obligatorio 75% a menos que se indique diferente	Frecuencia mínima de muestreo	Método de análisis e inspección
1	PH		7 a 9	Trimestral	Electrometría, medido In Situ al momento de muestreo
2	Temperatura	no debe variar en mas de 2 C con respecto a aguas no afectadas		Trimestral	Electrometría, medido In Situ al momento de muestreo
3	Coloración despues filtración mg Pt/l		no debe variar en mas de 10 mg Pt/l con respecto a aguas no afectadas	Trimestral	Filtro a través de una membrana de 45 micras, Método fotométrico usando la escala platino/cobalto
4	Sólidos Suspendidos (mg/l)		no debe variar en mas del 30% de contenido con respecto a aguas no afectadas	Trimestral	Filtro a través de una membrana de 45 micras, secado a 105 C y pesando Centrifugando (al menos 5 minutos con aceleración media de 2.8 a 3.2 g) secando a 105 C y pesando
5	Salinidad (ppt)	12 a 38	< 40 no se debe exceder en mas del 10% con respecto a aguas no afectadas	Mensual	Conducimetría
6	Oxigeno disuelto % Saturación (Percentil 95)	> 80	> 70	Mensual	Método de Winkler o Método electrométrico
7	Hidrocarburos, Petróleo		No deben presentarse en la superficie	Trimestral	Inspección visual
8	Plata, arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc (mg/l)		la concentración de estas sustancias debe ser tal que no afecten a las larvas y ostras	Medio Año	Espectroscopia de absorción atómica, precedida, donde sea necesario, por concentración y/o extracción
9	Coliformes Fecales/ 100 ml	< 300		Trimestral	Método de dilución con fermentación
10	Sustancias que afecten el sabor		Concentración tal que que no se pueda sentir el cambio de sabor		Examen de sabor del cultivo cuando se presume que hay presencia de alguna sustancia perjudicial

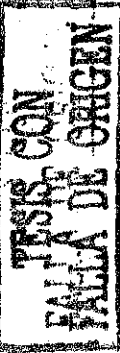
Tabla 1.3. Parámetros según el Concilio Europeo de las Comunidades para Uso de Litoral de pesca y cultivos marinos

La reglamentación mexicana que se debe cumplir con respecto a la calidad del agua en las regiones costeras se presenta en la Tabla 1.4



Parámetros	Ríos						Embalses Naturales y Artificiales						Aguas Costeras						Suelo		Humedales naturales (B.)			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de la vida acuática (C.)		Uso de riego agrícola (B)		Uso público urbano (C.)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (A)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B.)					
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.		
mg/l (excepto cuando se especifique)																								
Temperatura (C) (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40	40	40		
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25		
Materia flotante (3)	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente		
Sólidos sedimentables (ml/L)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	75	125	75	125	75	125		
Demanda bioquímica de oxígeno5	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	75	150	75	150	75	150		
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	40	60	15	25	40	60	15	25	40	60	15	25		
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30	5	10		
Arsénico (*)	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2		
Cádmio (*)	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2		
Cianuros (*)	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0		
Cobre (*)	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0		
Cromo (*)	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0		
Mercurio (*)	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01		
Níquel (*)	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0		
Plomo (*)	0.5	1.0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1.0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1.0	0.2	0.4	0.5	1.0	0.2	0.4	0.5	1.0		
Zinc (*)	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20		
(1) Instantáneo	(2) Muestra simple promedio ponderado																						(*) medidos de manera total	
P.D. = Promedio diario	P.M. = Promedio mensual																							
(A), (B) y (C.): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos	N.A. = No es aplicable																							
Fuente: Diario Oficial de la Federación del 6 de enero de 1997																								

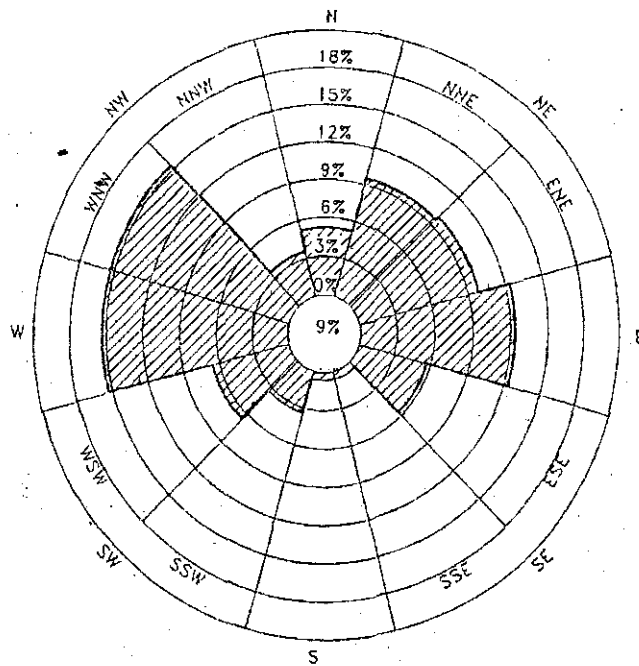
Tabla 1.4. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos, metales pesados y cianuros



1.5.1.4 Datos oceanográficos

Mediante los datos oceanográficos se estudiarán las características que el medio marino receptor tiene para transportar y dispersar contaminantes, así como las condiciones para las obras necesarias. Entre estos datos se tienen las mediciones de corriente, temperatura, mareas, oleaje, batimetría y geología, además de los estudios específicos de dispersión y desaparición de contaminantes en zonas litorales.

Sobre la presentación de los datos de carácter oceanográfico, que suelen constituir una base de datos de gran tamaño, se usan los medios habituales (rosa de viento y corrientes, funciones de distribución, etc.) como los que se ve en la *Figura 1.3*



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 1.3. Ejemplo de una rosa de viento

1.6 ESTUDIO DE LA RED DE COLECTORES

1.6.1 Dimensionamiento hidráulico y ambiental

Se denomina dimensionamiento hidráulico de la red de colectores, a los estudios orientados a obtener los diámetros necesarios, para que con una frecuencia estadística de 10 o 20 años el agua pueda ser transportada adecuadamente hasta su lugar final de disposición y no se produzca una inundación. Una vez captada el agua residual y de lluvia de una cuenca, se evacua una cierta proporción al medio receptor (alivios), y la resultante se une a otras procedentes de otras subcuencas, mediante un colector interceptor el cual se lleva a la planta de tratamiento, al cual sigue, de acuerdo al nivel de tratamiento de la planta, un emisor submarino, para llevar finalmente el agua hacia mar adentro.

Principalmente, el dimensionamiento hidráulico influye en la red de alcantarillado, mientras que el diseño de aliviaderos y el interceptor general son el principal objeto del diseño ambiental. Los distintos

componentes tienen una estrecha relación, por ello cuando se propone un cierto sistema de control en los aliviaderos, se valora la influencia de la capacidad de desagüe de las subcuencas afectadas y se toma en cuenta las características de la red de alcantarillado para el correcto diseño de los sistemas de alivio. La determinación del gasto a incorporar desde una de las subcuencas con este objetivo, constituye lo que se denomina dimensionamiento ambiental de la red de colectores.

El diseño se realiza de modo integral con otros elementos del sistema general de saneamiento (usos establecidos y capacidad de asimilación de las diferentes instancias relativas a los usos), y la propia red de colectores.

Por lo tanto, es necesario atender los siguientes elementos:

- Gasto a incorporar al colector principal
- Dispositivos de almacenamiento en red (tanque de tormenta)
- Selección del punto de alivio

Los dos primeros establecen el número de alivios, la duración y volumen, y por consiguiente la carga contaminante evacuada al medio acuático receptor.

Número de Habitantes	Clima (L/hab*d)		
	Cálido	Templado	Frío
Zonas rurales			
Áreas rurales	190	130	70
Áreas rurales >2500	350	300	250
Zonas urbanas			
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 en adelante	350	300	250

Tabla 1.5 Dotaciones para el diseño de acueductos, IMTA, 1995

1.6.2 Planta de tratamiento de aguas residuales en el saneamiento litoral

La planta de tratamiento de aguas residuales es el elemento básico y primordial de un sistema de saneamiento, la cual debe ser diseñada conjuntamente con el resto del sistema con el objeto de solucionar las causas de contaminación de modo más eficiente. Para el diseño adecuado de una planta de tratamiento se necesita determinar el gasto y concentración de contaminantes de entrada y tipo de proceso a instalar para el tratamiento.

El esquema completo de una planta de tratamiento se indicada en la *Figura 1.4*.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

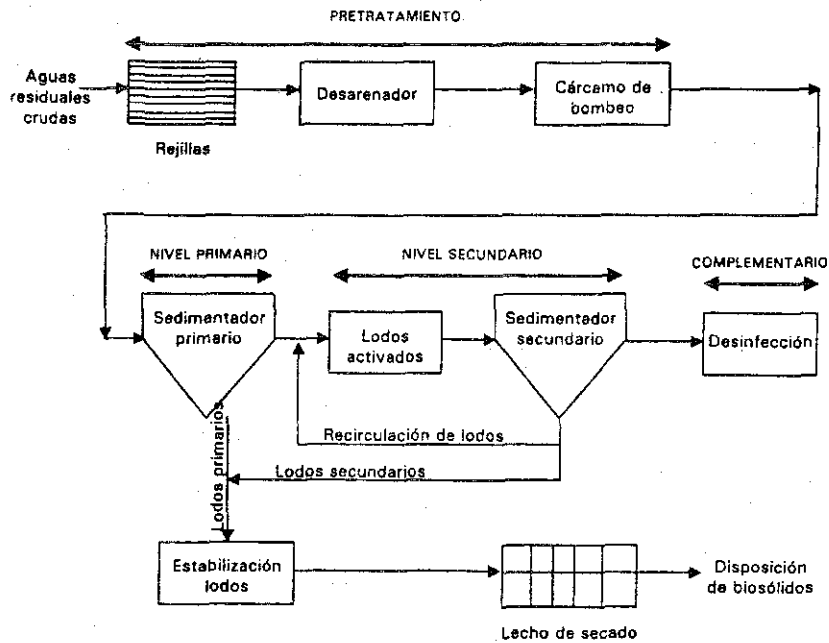


Figura 1.4. Tratamiento de una planta convencional de agua residual doméstica

Los procesos que conforman cada nivel de tratamiento se indican en la *Tabla 1.6*

Etapa	Proceso
Pretratamiento	Cribado, Flotación Desarenación
Primario	Sedimentación Reoxigenación
Secundario	Procesos Biológicos Coagulación-Floculación
Terciario/avanzado	Filtración Remoción de N y P Remoción de detergentes
Complementario	Desinfección

Tabla 1.6. Niveles de tratamiento

De acuerdo al tipo de tratamiento primario que se utilice, se alcanzan los porcentajes de remoción especificados en la *Figura 1.5*

Proceso	Configuración	% SST	% DBO	% P
Primario convencional	DA+SP	65	30	11
Primario avanzado	(AC)DA+(AP)SP	80-85	50-55	31
Primario químico	(AC)DA+(FL)+(AP)SP	>90	75	95
Químico en dos etapas	DA+SP+(AC)F+(AP)+SeS	83	52	SD

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

DA: Desarenación	AP: Adición de polímero
SP: Sedimentación primaria	F: Flocculador
AC: Adición de coagulante	SeS: Sedimentación secundaria

Figura 1.5. Tipos de tratamiento primario, adaptado Jiménez (2001)

1.6.3 Selección del gasto máximo a tratar en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

La primera consideración a tener en cuenta para establecer el gasto máximo de la PTAR, debe atender a criterios de funcionalidad de la planta. La segunda consideración, es el diseño hidráulico y ambiental de la red de saneamiento.

Es importante destacar que el gasto máximo de tratamiento de la PTAR, en ningún caso puede descender por debajo del gasto máximo presentado en tiempo de estiaje.

1.6.4 Calidad del efluente y nivel de tratamiento en la PTAR

Para un mismo esquema de distribución de gastos, las acciones derivadas de la protección del medio marino están relacionadas con la composición y cantidad de elementos susceptibles de producir contaminación en el medio que estén presentes en el efluente transportado.

La composición típica del agua residual según Jiménez (2001) es la indicada en *Tabla 1.7*.

Parámetro	Media (1)	Límite inferior (1)	Límite superior (1)
PH (potencial hidrógeno)	7.5	6.8	8.2
T (.C) (temperatura)	21.6	17.7	25.6
DBO (demanda bioquímica de oxígeno)	244	192	296
DQO (demanda química de oxígeno)	508	425	591
SSe (sólidos sedimentales)	5.0	2.7	7.3
GyA (grasas y aceites)	85	55	108
ST (sólidos totales)	1191	915	1468
SST (sólidos suspendidos totales)	211	164	258
SDT (sólidos disueltos totales)	981	755	1207
SSV (sólidos suspendidos volátiles)	140	108	172
SSF (sólidos suspendidos fijos)	97	39	154
SDV (sólidos disueltos volátiles)	340	193	487
SDF (sólidos disueltos fijos)	655	292	1017
Color (unidades Pt-Co)	215	110	540
Coliformes (NMP/100 ml)	6x10 ⁸	-	11.6x10 ⁸
Coliformes fecales (NMP/100ml)	1.6x10 ⁸	-	6.6x10 ⁸
N-NO ₃ (nitratos)	0.5	-	0.9
Fenoles	0.1	-	-
N-NH ₃ (amoníaco)	19.3	14.5	24.2
N-total (nitrógeno total)	39.3	29.4	49.2
N ₂ oxígeno (nitrógeno orgánico)	17.2	12.0	22.4

N-NO ₂ (nitritos)	0.5	-	-
Cloruros (Cl)	141	60	223
PO ₄ (fosfatos totales)	23.0	8.8	37.5
P total (fósforo total)	17.0	1.5	32.5
P orgánico (fósforo orgánico)	3.0	-	-
P inorgánico (fósforo inorgánico)	8.8	-	-
Alcalinidad (como CaCO ₃)	323	145	501
C.E. (conductividad eléctrica mhos/cm)	1558	1162	1954
SAAM (detergentes)	13.5	4.4	22.6
SO ₄ (sulfatos)	242	-	501
RAS (relación de adsorción de sodio)	5.1	0.6	9.5
Boro	3.1	-	8.5

(1) concentración en mg/L, excepto donde se indique

Tabla 1.7. Características de calidad del agua residual en poblaciones mexicanas mayores de 10000 habitantes

1.6.5. Diseño del emisor submarino

El emisor submarino es la parte del sistema de saneamiento litoral que incluye la tubería por donde se transporta el efluente hacia mar adentro y los difusores a través de los cuales se integra el flujo transportado con el medio receptor, este diseño se trata en el capítulo 4. En la *Figura 1.6*, se muestra un corte longitudinal de una planta de tratamiento con su emisor y difusores funcionando

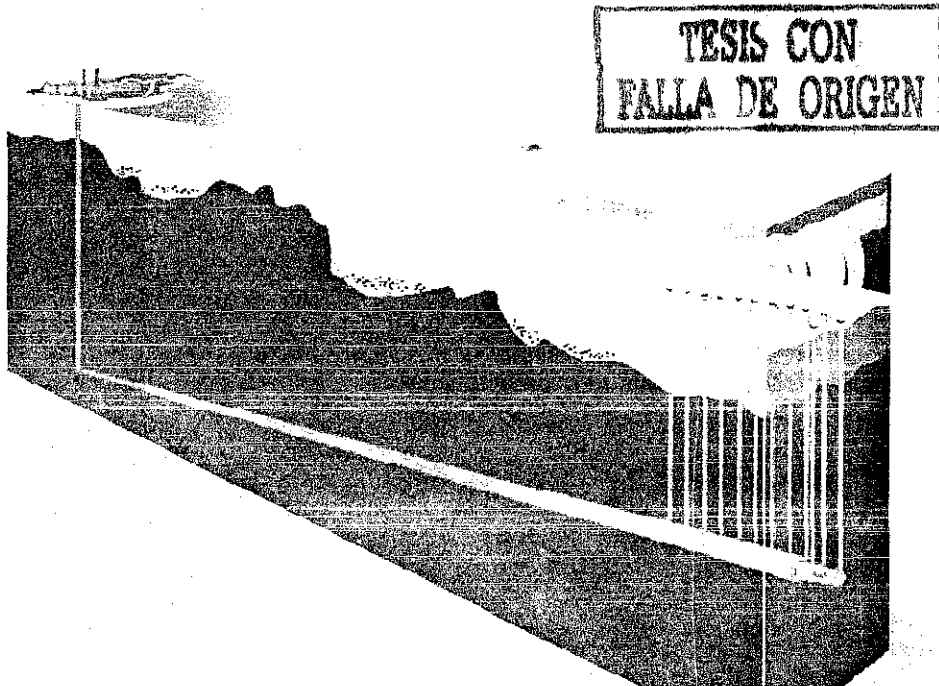


Figura 1.6. Vista esquemática de un emisor submarino y difusores, Boston (Massachussets Water Resources Authority –MWRA-, 2000)

1.7 ESTUDIO DEL IMPACTO EN EL LITORAL

En esta fase, el estudio del comportamiento de la dispersión de contaminantes en la situación actual es muy importante. Normalmente, la escasez de información histórica conlleva al uso de modelos matemáticos o empíricos para entender la evolución actual de los sistemas, y más aún para el estudio de posibles escenarios. Esta falta de información obliga a que la realización de dichos estudios se realice en términos de la probabilidad de ocurrencia de los diferentes factores que gobiernan los fenómenos de dispersión de contaminantes.

Generalmente, la contaminación del medio marino procedente de una red de saneamiento, es de tipo microbiológico, lo cual afecta las concentraciones de oxígeno disuelto en las zonas de poca renovación de agua. Estos efectos son más importantes cuando son producidos por vertidos de estructuras de alivio, debido a la falta de tratamiento, y en ocasiones a la inadecuada ubicación de los mismos. También es en este tipo de vertidos en los que la complejidad en su modelado radica en la aleatoriedad en que se presentan, que comúnmente dependen del régimen pluviométrico de la zona.

No debe olvidarse que el principal interés en la utilización de modelos numéricos, es la capacidad de evaluar diferentes circunstancias o diseños sin la necesidad de efectuar un número muy grande de costosas tomas de datos específicos.

Conocidas las cargas contaminantes introducidas en el medio marino procedentes del vertido final y de los alivios producidos por tormentas, las etapas metodológicas que se deben cumplir para el análisis de una determinada situación se especifican en el diagrama de la *Figura 1.7*.

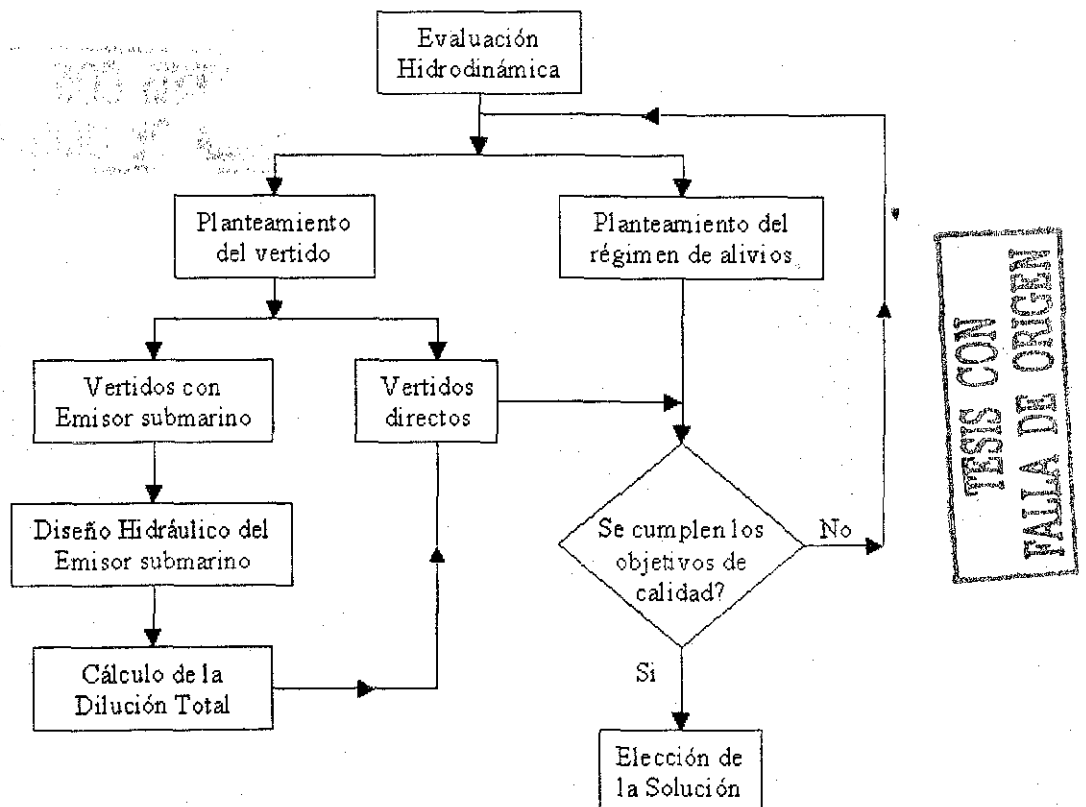


Figura 1.7. Diagrama de flujo para el estudio de los efectos de los vertidos continuos y esporádicos de un saneamiento.

1.8 PLAN DE VIGILANCIA Y CONTROL AMBIENTAL

Para poder evaluar si se están cumpliendo los criterios de calidad en el diseño de sistema global de saneamiento, se requiere un último elemento que compruebe el funcionamiento correcto de todos los componentes planteados. El plan de vigilancia y control ambiental (PVCA) es la herramienta utilizada para realizar dicha función. Desde un punto de vista conceptual, se puede resumir en cuatro aspectos los objetivos planteados en un PVCA.

- Asegurar que las acciones de saneamiento se realizan de acuerdo con las autorizaciones pertinentes.
- Asegurar la validez de las predicciones efectuadas en el diseño.
- Cuantificar e identificar los cambios producidos en el medio receptor como consecuencia de las acciones realizadas.
- Tomar las medidas correctoras necesarias en los distintos elementos del sistema general de saneamiento.

1.8.1 Diseño y desarrollo del programa de vigilancia y control ambiental

El diseño técnico de los programas de vigilancia y seguimiento está relacionado con el proceso de decisión sobre: ¿Qué medir?, ¿Como?, ¿Cuándo?, ¿Dónde hay que hacer las mediciones? y ¿Cómo analizar, interpretar, sintetizar y presentar los datos obtenidos?.

En la literatura especializada se han planteado esquemas de trabajo que facilitan la estandarización de todos los aspectos que se deben considerar en el diseño de los programas de vigilancia.

Del análisis y la conjugación de las distintas alternativas surge una metodología genérica del diseño, *Figura 1.8*, la cual se fundamenta básicamente en el modelo desarrollado por la National Academy of Sciences (NCR, 1990).

La finalidad de esta síntesis metodológica es proporcionar una guía para formular objetivos de partida claros, y diseñar programas de muestreo eficientes que estén de acuerdo con los objetivos planteados. Dependiendo de los objetivos del Programa de Vigilancia, podrá variar la relevancia de los diferentes elementos que integran el esquema metodológico.

De acuerdo con el esquema metodológico de la figura *Figura 1.8*, éste representa el primer paso en el desarrollo de cualquier programa de vigilancia y uno de los aspectos que condicionan en mayor medida su desarrollo posterior. Su finalidad es doble, ya que proporciona al gestor la información sobre las limitaciones del seguimiento y al técnico las bases de datos para plantear las hipótesis de partida.

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

Uno de los elementos básicos de gestión de la calidad presentada en este estudio, es el establecimiento de objetivos de calidad por cada uno de los usos reconocidos en el entorno del estudio. Por lo tanto dichos objetivos genéricos representan un punto obligado en este análisis y posteriormente, para el enunciado de los objetivos de vigilancia.

Por otra parte, el propio dimensionamiento ambiental de sistemas diseñado constituye un primer paso en el proceso analítico, representativo de la situación prevista en el caso del funcionamiento normal de todas las infraestructuras.

No obstante la previsión inicial de impactos debe contemplar también otras situaciones por extremas que se consideren, con el fin de reducir al máximo la posibilidad de su aparición durante el seguimiento normal de todas las infraestructuras.

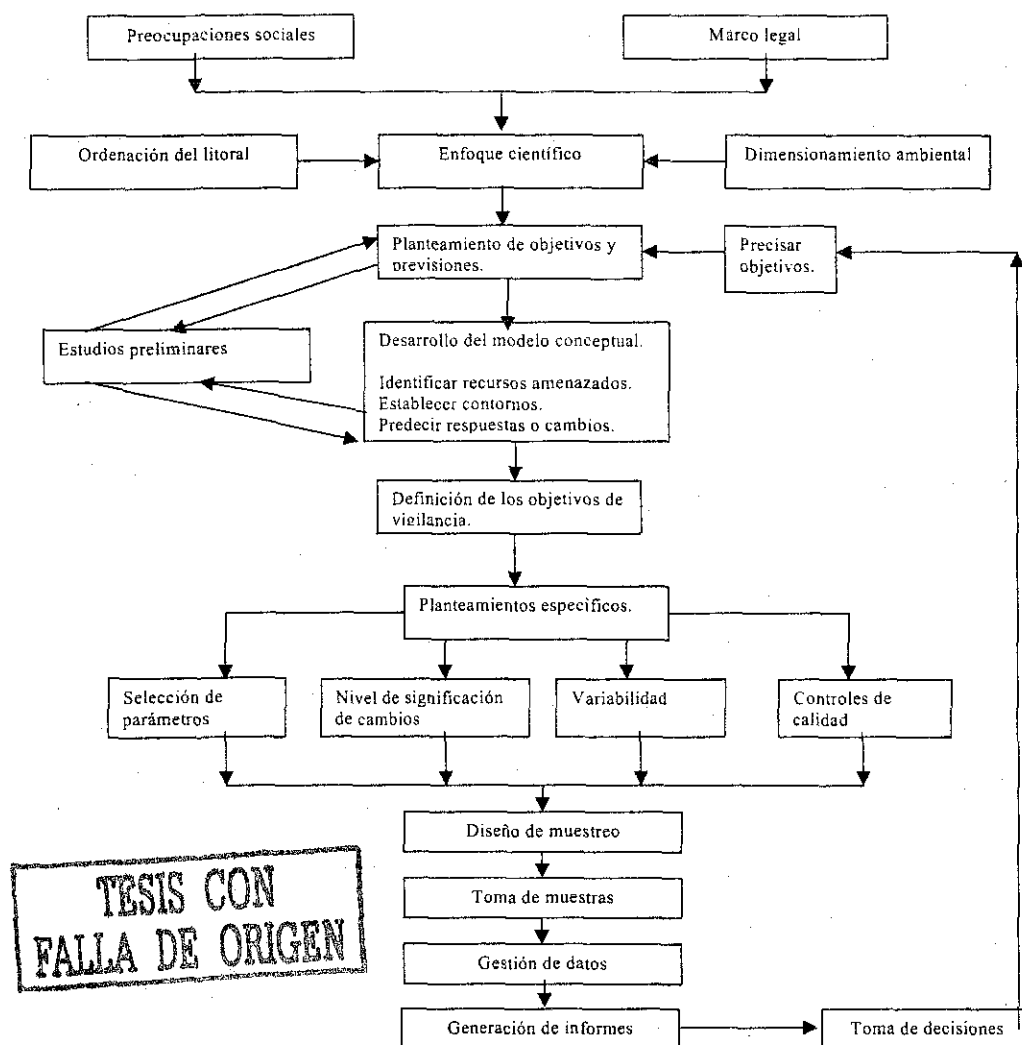


Figura 1.8. Esquema metodológico aplicable al desarrollo del plan de vigilancia y control ambiental

1.9 CONCLUSIONES

Un sistema de saneamiento litoral busca proteger adecuadamente las distintas zonas del medio receptor que ven alterado su equilibrio por las acciones humanas, como se realiza a través de las actividades de recreación, industriales, etc, por lo tanto su diseño debe hacerse de tal manera que comprometa a todos los estamentos relacionados.

Al diseñar un sistema de saneamiento de manera integral, se toma como uno de los principales parámetros la capacidad de asimilación de las aguas receptoras. Debido a la importancia de la conservación de espacios litorales y la repercusión de los efectos negativos de los vertidos del sistema de saneamiento, es necesario implementar dicho sistema de saneamiento de manera integral y sistemática.

CAPÍTULO 2 CONCEPTOS BÁSICOS

2 CONCEPTOS BÁSICOS

La principal característica hidráulica de la disposición final del agua residual dentro del océano, es la mezcla de grandes volúmenes de agua en presencia de alta turbulencia. Uno de los sistemas más eficientes para generar este tipo de fenómenos es el llamado difusor submarino. Un difusor es una tubería que transporta el flujo proveniente de una planta de tratamiento. El extremo de mar adentro está cerrado, de tal forma que el efluente sale por una serie de orificios, también llamados puertos, dispuestos en la parte final del tubo. Los diámetros de la tubería y de los agujeros son tales que la presión dentro del tubo es uniforme, lo que origina que el gasto que sale por cada orificio sea el mismo. En ocasiones los puertos se utilizan para conectar pequeños tubos que facilitan la descarga, estos se conocen como ductos ascendentes.

En la Figura 2.1 se presenta un esquema de un difusor submarino enterrado con ductos ascendentes, es importante aclarar que la tubería que compone el difusor generalmente se coloca sobre el fondo marino, por lo que está sometida a las fuerzas provocadas por el oleaje y las corrientes locales.

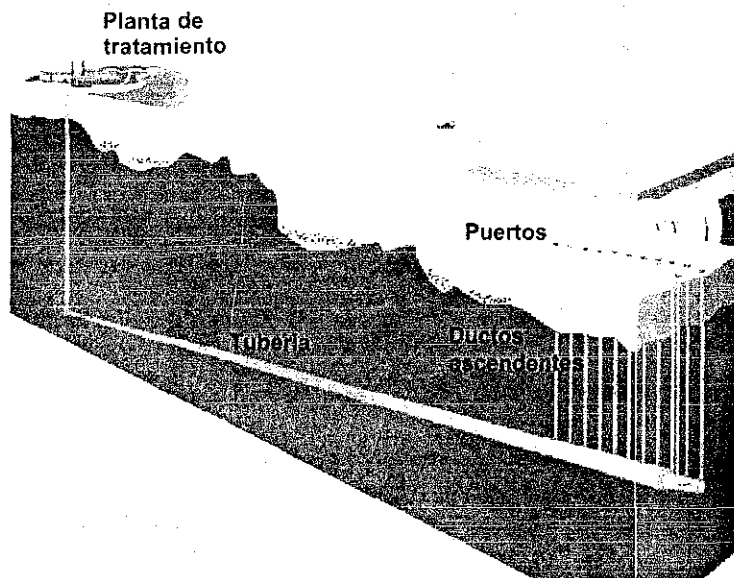


Figura 2.1. Esquema típico de un difusor submarino enterrado

El término de chorro o pluma se aplica al comportamiento del efluente descargado dentro del fluido receptor, en este trabajo, equivale al agua residual producida por una planta de tratamiento, la cual es descargada a través de un difusor y sus puertos.

2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MEZCLA TURBULENTA

El término "pluma" se utiliza para describir la forma que el efluente adquiere si los efectos de flotación son predominantes, ver Figura 2.2 Si los efectos de la velocidad de salida del flujo (cantidad de movimiento) son mayores que los de flotación, no se habla de pluma sino de "chorro", un chorro flotante es el término que se aplica a una pluma después de que ha viajado una cierta distancia en el océano.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA LE ORIGEN

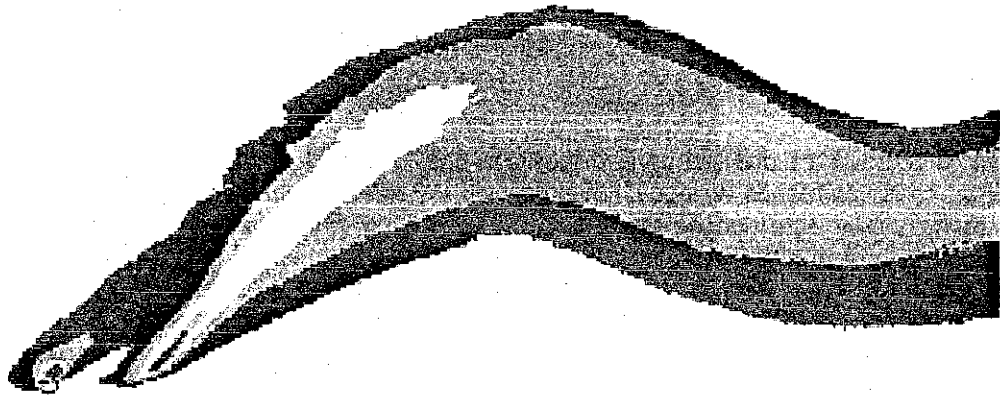


Figura 2.2. Pluma producida por una descarga submarina

Generalmente, las descargas de un emisor submarino tienen, al inicio, forma de chorro, como se indica en la Figura 2.3, pero rápidamente pierde cantidad de movimiento y se convierten en una pluma, esto a corta distancia del punto de origen.



Figura 2.3. Chorro producido por una descarga submarina

Para caracterizar si una descarga se comporta como pluma o chorro se utiliza el número de Froude densimétrico, el cual está dado por la ecuación (2.1), se denomina densimétrico por que considera la diferencia que existe entre las densidades del agua de mar y del agua residual

$$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g D_o}} \quad (2.1)$$

Donde $\Delta\rho$ es la diferencia de densidades que hay entre el efluente y el agua de mar, U_o y D_o son los valores de la velocidad y el diámetro de la descarga.

Para descargas con valores del número de Froude densimétrico mucho más grandes que 1.0 se considera que esta se comporta como un chorro, para números solo un poco mayores que 1.0 se habla de una descarga de chorro flotante, y para valores menores a 1.0, no se presenta la fase del chorro y se habla de pluma.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

2.1.1 Arrastre y difusión

2.1.1.1 Arrastre

El arrastre fue definido por Morton, Taylor y Turner (1956) como la incorporación de una descarga turbulenta dentro de un fluido no turbulento. Turner y Kraus (1967) introdujeron este concepto dentro de la modelación del comportamiento de una pluma de agua residual en el océano. Posteriormente, Lorin (1999) lo define como el proceso por medio del cual una pluma que es descargada dentro de un medio receptor se incorpora a este produciéndose una fuerte mezcla por medio de la cual ambos fluidos conforman uno solo.

Otro efecto que actúa es el debido a la turbulencia, los remolinos que existen en la frontera de la descarga toman grandes cantidades de agua de mar y la llevan dentro de la descarga, esta acción turbulenta también mezcla los dos fluidos, este es un proceso cíclico, donde el fluido receptor penetra en la descarga y donde esta, a su vez, se incorpora al medio receptor, ver Figura 4.2 del capítulo Modelos.

Si el agua residual que pasa a través de los puertos en el difusor es más ligera que el agua en la cual se deposita, la descarga tiende a elevarse y a alcanzar un nivel de equilibrio, el cual puede ser la superficie o un nivel de sumergencia intermedio, esto ocurre debido a la flotación, cuando la pluma ya se ha estabilizado se produce un segundo tipo de movimiento, el cual es debido a las corrientes locales, con este movimiento también se logra que el efluente se introduzca en fluido receptor y viceversa.

El resultado total para los fenómenos de arrastre y flotación es una pluma cuya tasa de flujo de masa se incrementa mientras entra más fluido del medio receptor, dado que la masa debe ser conservada, el fluido receptor que entra en el efluente debe ser reemplazado por otro fluido proveniente del ambiente, esto causa un flujo neto de fluido desde el ambiente hacia el efluente, este proceso de arrastre es el resultado de un intercambio de cantidad de movimiento entre el ambiente y el efluente. Cerca de la descarga, la tasa de arrastre es alta, donde la velocidad relativa entre el chorro y el ambiente es grande, cuando la tasa de arrastre disminuye el efluente sigue entrando en el ambiente a una menor velocidad y poco a poco se va perdiendo cantidad de movimiento.

Cuando la cantidad de movimiento se ha disipado, la mezcla se realiza entonces por la turbulencia ambiental y la difusión. La turbulencia ambiental (es la producida por las corrientes y el oleaje locales) produce la mezcla en los bordes del efluente pero con una tasa mucho menor que la producida por la entrada brusca del efluente en el mar.

Con las ideas anteriores se pueden definir claramente dos regiones, la primera se llama campo cercano y es la región donde la mezcla se realiza debido a la turbulencia proveída por la descarga, es decir, por la cantidad de movimiento, la segunda región es donde la mezcla es producida por las corrientes locales y la difusión.

2.1.1.2 Difusión

La difusión de la descarga en el ambiente es la combinación de dos fenómenos, la difusión molecular y la mezcla turbulenta. La difusión molecular es el resultado del movimiento aleatorio de las moléculas de un fluido. En un fluido con una concentración uniforme de un contaminante, el movimiento aleatorio produce que el número de moléculas que cruza una frontera imaginaria sea el mismo en las dos direcciones, si la concentración del contaminante es más grande en uno de los dos lados, más moléculas de este contaminante cruzarán hacia el lado de menor concentración, esto conlleva a una

difusión de partículas de la zona de mayor concentración a la de menor concentración, la tasa de difusión se expresa por medio de la ley de Fick, ecuación (2.2)

$$\vec{f}_i = -D_i \nabla C_i \quad (2.2)$$

Donde \vec{f}_i , es el vector de flujo de difusión, D_i es el coeficiente de difusión del contaminante i , y C_i es el gradiente de concentración del contaminante i , el signo menos se incluye para dar una difusión positiva en la dirección en la cual la concentración disminuye. El coeficiente de difusión es, a menudo, interpretado como la combinación de la difusión molecular y la difusión turbulenta, es importante tener en cuenta que la difusión molecular es muy pequeña comparándola con la turbulenta, por lo cual puede ser despreciada.

Por ejemplo, si una gota de colorante se deja caer en una cubeta con agua, después de cierto tiempo, t_1 , se estima que este colorante se ha dispersado completamente en toda el agua, el mecanismo físico por medio del cual se dispersa el colorante es la difusión y el tipo de difusión que actúa en este caso, es la difusión molecular. Ahora, si además dentro de la cubeta hay un sistema de finas mallas que están oscilando arriba y abajo, se producen unos pequeños remolinos que permiten que el colorante se disperse en un tiempo t_2 , el cual es mucho menor que t_1 , este último tipo de dispersión es la que actúa en el campo lejano.

2.1.2 Zona de desarrollo o crecimiento

Los perfiles de velocidad y concentración, dado un flujo turbulento, en una tubería son de forma trapecial. Como resultado, los perfiles a la salida de la tubería tienen forma similar a un sombrero de copa, como se muestra en la Figura 2.4.

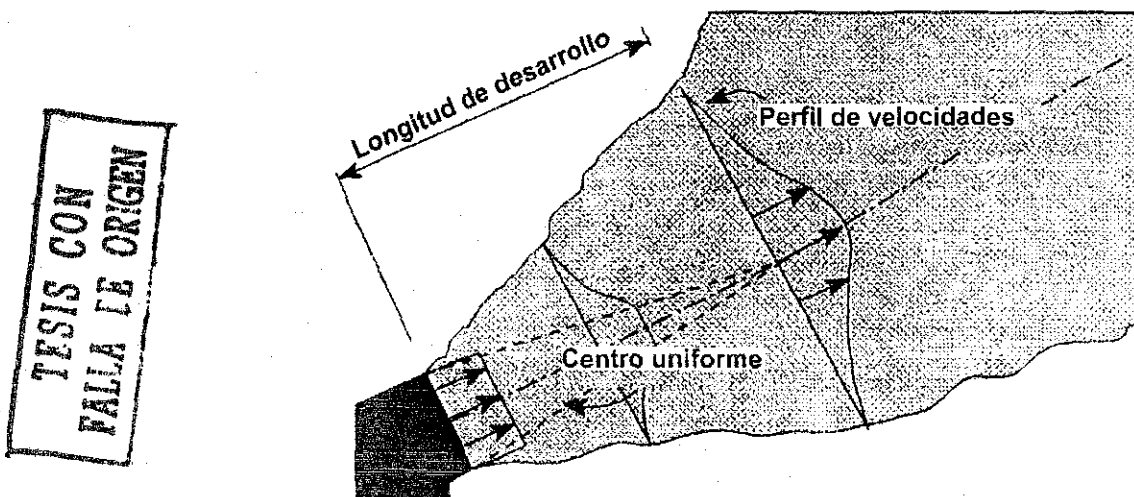


Figura 2.4. Perfiles en la zona de desarrollo

Una vez que el chorro, entra en contacto con el fluido receptor, el proceso de difusión produce una capa de contacto donde el ambiente al penetrar en el efluente lo desacelera y a su vez, el efluente al entrar en el ambiente lo acelera. La velocidad y la concentración no cambian, a menos que las capas de contacto lleguen al centro, esta región, donde los perfiles cambian de la forma de sombrero de copa a una forma acampanada se conoce como zona de desarrollo. A partir de esta zona los perfiles

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tienen la misma forma, solo cambia su ancho y los valores centrales de la concentración. Los perfiles pueden expresarse como una función de probabilidad gaussiana, Lorin (1999)

$$\frac{u}{u_{cl}} = e^{-\left(\frac{r}{b}\right)^2} \tag{2.3}$$

Donde u_{cl} es la velocidad central, una aproximación adecuada para la ecuación (2.3) es la de un perfil a la potencia 3/2, el cual está dado por:

$$\frac{u}{u_{cl}} = \left[1 - \left(\frac{r}{b}\right)^{3/2}\right]^2 \tag{2.4}$$

En la ecuación (2.4) b' es el radio total, mientras que en la ecuación (2.3), b es el radio parcial de la pluma, el cual está determinado por la desviación estándar del perfil.

Si se comparan las ecuaciones (2.3) y (2.4) y haciendo $b=0.534b'$, para que los perfiles se intercepten cuando $u/u_{cl}=0.5$, se obtiene la Figura 2.5, en la cual se observa que los perfiles gaussiano y elevado a las 3/2 son similares, para los cálculos necesarios en los modelos numéricos se utiliza el perfil elevado a las 3/2, ya que este no se extiende, en sus extremos, hacia el infinito, como lo hace el perfil gaussiano, de esta manera, en la frontera se evitan problemas numéricos, como multiplicaciones o divisiones por un valor muy grande lo que generaría incoherencias.

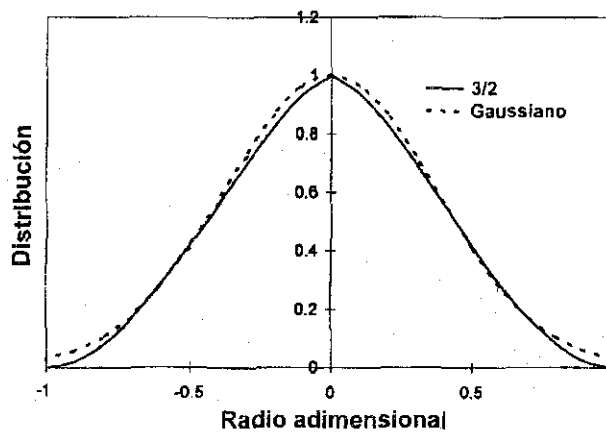


Figura 2.5. Perfiles Gaussiano y elevado a la 3/2.

2.1.3 Dilución

La dilución es a menudo utilizada para explicar la relación que hay de agua pura con respecto al efluente que es agua con contaminantes. La definición usual para la dilución es la relación entre el flujo en la pluma y el flujo en la descarga. Puesto que la velocidad varía sobre el área de la pluma, la dilución para un chorro o pluma de forma circular se calcula con la ecuación (2.5)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

$$S = \frac{\int_0^{\infty} u dA}{U_0 \pi \frac{D_0^2}{4}} \quad (2.5)$$

Mientras la pluma o el chorro se eleva hacia la superficie, el flujo se mezcla con el agua que lo rodea, el término dilución se utiliza, por ejemplo si a 1 litro de agua limpia de mar (1000 cc) se agregan 100 cc de un líquido que se puede mezclar, por ejemplo el agua residual, la dilución de este líquido se dice que es 1100:100, es decir 11:1, otra manera de cuantificar la misma dilución es decir que esta es de 11.

El agua residual en el centro de la pluma o el chorro tiene menos oportunidad de mezclarse con el agua de mar que el efluente que se encuentra en la periferia, para un punto dado de una pluma, la dilución sobre el eje de ésta será siempre la mínima, es decir, hay mas concentración del agua residual.

La ecuación de conservación de masa para un contaminante esta dada por:

$$Q_0 C_0 + E C_a = \int_0^{\infty} u C dA \quad (2.6)$$

Donde C_0 es la concentración del contaminante en la descarga, C_a es la concentración del mismo contaminante C en el fluido receptor y E es el arrastre total del fluido en el punto de la pluma donde la integral es evaluada. La ecuación (2.6) asume que las densidades tienen un valor muy cercano y por lo tanto se pueden eliminar.

Si la concentración en el fluido receptor es cero, la ecuación anterior se simplifica y se obtiene

$$Q_0 C_0 = Q \bar{C} \quad (2.7)$$

donde \bar{C} es el flujo medio de la concentración a través de todo la pluma, la expresión (2.7) se convierte en:

$$\frac{\bar{C}}{C_0} = \frac{Q_0}{Q} \quad (2.8)$$

$$\frac{\bar{C}}{C_0} = \frac{1}{S}$$

Si la concentración en el ambiente no es nula, la simplificación anterior no se puede realizar, en vez de esto, la ecuación se convierte en:

$$Q_0 C_0 + (Q - Q_0) C_a = Q \bar{C} \quad (2.9)$$

La cual puede reordenarse como:

$$\frac{\bar{C}}{C_0} = \frac{1}{S} + \frac{(S-1)}{S} \frac{C_a}{C_0} \quad (2.10)$$

Al derivar adecuadamente estas ecuaciones se muestra que la definición de la concentración, cuando se usa un perfil que esta elevado a la potencia 3/2, es:

$$\bar{C} = C_{cl} \frac{\int_0^\infty [1 - (r/b)^{3/2}]^4 r dr}{\int_0^\infty [1 - (r/b)^{3/2}]^2 r dr} = 0.519 C_{cl} \quad (2.11)$$

donde C_{cl} es la concentración en el eje del contaminante o la sustancia que se desee analizar

Usando el resultado obtenido en (2.11) se obtiene la expresión (2.12), la cual indica la mínima dilución para una pluma circular:

$$\frac{S}{S_{cl}} = 1.93 \quad (2.12)$$

Cuando se utiliza un perfil gaussiano, la expresión (2.12) según Lorin (1999) igual a 2.0. Cuando ya se han combinado todas las plumas individuales de un difusor, la relación es igual a 1.43, para un perfil elevado a la potencia 3/2.

La característica fundamental por la cual se busca que el agua donde se dispone el efluente esté estratificada, es que si el diseño es adecuado y las condiciones del sitio lo permiten, el efluente nunca alcanzará la superficie del mar. Un efluente sumergido se desarrolla si la densidad de la descarga es igual a la densidad del agua de mar en alguna profundidad intermedia. Este equilibrio en la pluma es función de las condiciones ambientales, si estas varían el efluente puede alcanzar la superficie, aunque solo sea temporalmente.

La razón por la cual los difusores son más utilizados que las tuberías abiertas en uno de sus extremos (las cuales tienden a formar chorros, en vez de plumas), para la disposición de las aguas residuales, es que la dilución inicial lograda por estos es mucho mayor. Lo deseable es obtener una gran dilución inicial para que gracias a los fenómenos de difusión y advección, la nube de efluente producida se extienda a otras áreas, generando así la mínima alteración al medio ambiente.

El agua de mar, a través de la cual se diluye el agua residual tiene las siguientes clasificaciones, estancada o en movimiento y de densidad constante o de densidad que se incrementa con la profundidad. El presente trabajo trata el caso más general, es decir, movimiento y densidad variable en el agua de mar.

2.1.4 Cantidad de movimiento

La ecuación de cantidad de movimiento en un cuerpo libre o volumen de control se deriva de la segunda ley de Newton. Se conoce como la cantidad de movimiento de un elemento de masa M , al producto de esta por su velocidad. Por lo tanto la segunda ley de Newton establece que la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre una masa de fluido es igual a la rapidez del cambio del vector lineal cantidad de movimiento de la masa de fluido.

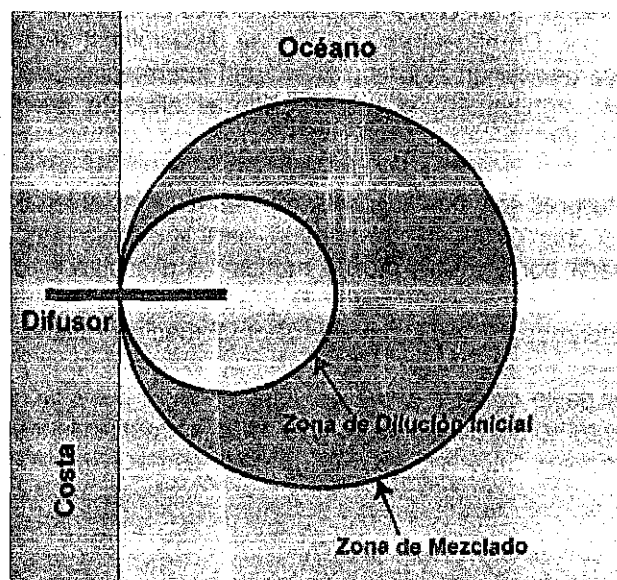
2.2 REGLAMENTACIÓN

Las concentraciones de los contaminantes tóxicos y térmicos son controladas exhaustivamente por las leyes de cada lugar donde se construye un sistema de saneamiento litoral, sin importar si es del orden municipal, estatal o nacional, estas leyes deben indicar los niveles máximos de concentración de contaminantes que puedan alcanzar las descargas para que se cumpla el ordenamiento de litoral propio de cada lugar.

La zona de mezclado se define como aquel lugar donde se permite que la concentración de algunos contaminantes exceda los valores críticos, para minimizar los impactos de estos contaminantes en el ambiente, las concentraciones permisibles al final de esta zona y el tamaño de esta zona, están restringidos a valores pequeños, ver Figura 2.6.

Los contaminantes se clasifican en: (a) Convencionales o de procedencia natural, por ejemplo la demanda bioquímica de oxígeno (b) no convencionales, como el oxígeno químico (c) tóxicos, (d) calóricos y (e) desechos de dragados marinos.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha desarrollado criterios de calidad de agua para los contaminantes tóxicos, el primero es el Criterio de Concentración Continúa (CCC) o Concentración Crónica, el cuál regula para la zona de mezclado; el segundo criterio es la Concentración Máxima Permitida (CMP), este valor es muy exigente y debe concentrarse a una zona de dilución tóxica muy pequeña, la cual es conocida como Zona de Dilución Inicial (ZDI), las zonas de mezclado y de dilución inicial son por lo tanto diferentes, siendo la segunda de estas la más restrictiva.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.6. Esquema de las zonas de concentración

La EPA define la zona de dilución inicial como el valor más pequeño obtenido por cualquiera de los siguientes criterios

- 10% de distancia reglamentada para la zona de mezclado.
- Una distancia igual a 50 veces la raíz cuadrada del área de descarga de un puerto del difusor.
- Una distancia igual a 5 veces la profundidad local a la cual se encuentra construido el difusor

La zona de mezclado se define como la distancia medida desde los puertos de descarga para la cuál la pluma alcanza la superficie o es atrapada por la estratificación, lamentablemente esta definición, por ser muy simple, no puede aplicarse satisfactoriamente a las descargas en ríos o lagos. Para el modelo propuesto por Roberts, Snyder y Baumgartner (RSB) (1989), la zona inicial de mezclado se define como aquella región donde la turbulencia generada por el chorro del efluente al salir produce una mezcla rápida con el fluido receptor, esta zona termina cuando la cantidad de movimiento de la pluma desaparece.

Las concentraciones permitidas para los contaminantes son determinadas por medio de la valoración biológica. En este análisis, algunas especies de pequeños peces son expuestas a varias concentraciones del contaminante durante un periodo determinado de tiempo (24, 96 horas o más), la concentración que causa un cierto porcentaje de muerte en los peces después del tiempo de exposición es llamada como la concentración letal.

2.3 VARIABLES AMBIENTALES

Las variables ambientales que más influyen en las concentraciones de los contaminantes al final de la zona de mezclado, son la temperatura del agua, la profundidad en el lugar donde se realiza la descarga, las corrientes locales, la estratificación de la columna de agua, las variaciones de la marea, la configuración del canal cuando la descarga se realiza a superficie y la geometría del fondo.

2.3.1 Temperatura

La cantidad de radiación recibida por la tierra depende principalmente de la latitud, la época del año, la humedad y nubosidad de la atmósfera, una vez absorbida y transformada en forma de calor por el agua de los océanos, es almacenada y redistribuida a través de las corrientes. Sin embargo, este calor resultante, es decir, la temperatura, no solo tiene una variación horizontal sino también vertical, esto último se presenta como un gradiente, consecuencia de la disminución de calor conforme aumenta la profundidad.

Según de la Lanza (2001), se ubican en el océano tres capas claramente definidas:

- Capa superficial: de profundidad variable (desde la superficie hasta 200 metros) con una temperatura mas o menos constante y caliente habitable para la mayoría de los organismos, donde se sucede la transferencia térmica entre el aire y el agua.
- Capa intermedia, que se encuentra por debajo de la superficial cuyo grosor es regionalmente diferente, con un gradiente fuerte de disminución de la temperatura o termoclina (mas o menos un grado por cada 10 metros de profundidad).
- Capa fría, cercana a 4°C que va de nivel inferior de la termoclina hasta el fondo del océano, esta es la capa de mayor espesor

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De acuerdo con las características temporales de la termoclina, esta puede ser temporal o permanente, la primera se rompe por cambios de temperatura y mezcla el agua profunda con la superficial, esta condición se presenta en las latitudes templadas. La segunda no se rompe y es estable, por que no presenta cambios significativos de temperatura en la superficie que posibiliten la mezcla convectiva.

México se ubica dentro de la latitud que propicia altas temperaturas del aire que se ven reflejadas en el agua, sobre todo en ciertas áreas del golfo de México y de California.

En el Golfo de México, en el sentido horizontal (capa de 0 a 150 o 200 metros de profundidad) la temperatura destaca por el siguiente patrón espacial y temporal: durante los meses de diciembre, enero y febrero la temperatura es más baja debido a los frentes polares y vientos fríos ó nortes, que se reflejan en el agua a través de un gradiente que resulta de la influencia de las agua de la Corriente del Caribe, que son cálidas y penetran por el Canal de Yucatán y van perdiendo calor a lo largo de su viaje hacia el norte del golfo, además de las descargas de los ríos con temperaturas menores, en esta época las corrientes pueden oscilar entre 15 y 23°C, Figura 2.7

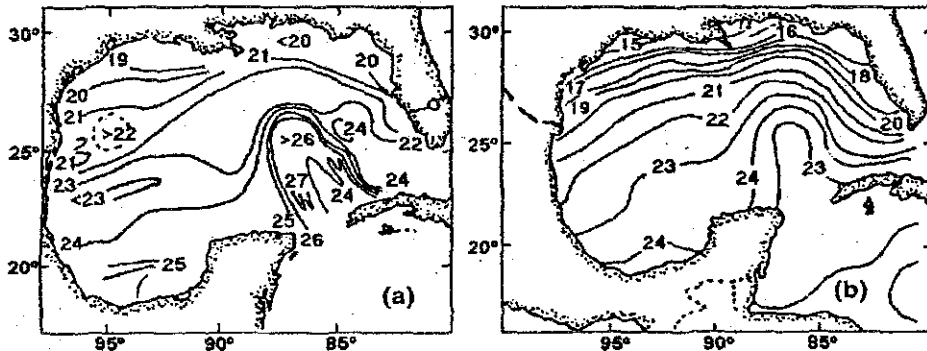


Figura 2.7 Patrón de temperatura superficial del golfo de México durante el invierno: (a) registros isotermales (Nowlin y McLellan, 1967), (b) datos de imagen de satélite (Secretaría de Marina, 1985)

En los meses que corresponden al verano (parte de mayo, junio, julio y agosto) el calentamiento del golfo es mayor debido al máximo de insolación que se registra, además la Corriente de el Lazo se introduce mas, alcanzando los 27° N, Figura 2.8

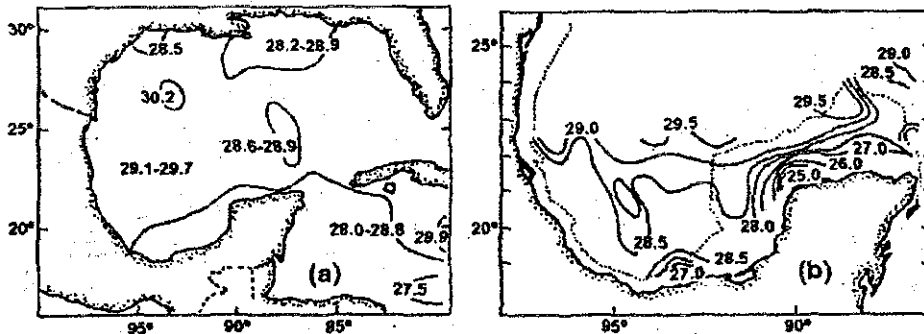


Figura 2.8 Patrón de temperatura superficial del golfo de México durante el verano: (a) datos de imagen de satélite (Secretaría de Marina, 1985), (b) Isotermas de la zona sur (Vázquez de la Cerda, 1979)

La corriente de el Lazo determina en buena medida la profundidad de la termoclina, según Robinson (1973), la termoclina es mas profunda en enero, hacia Cuba alcanza hasta 120 metros, y en México 90 metros, con tendencia a ser superficial en agosto. Corresponde a toda la plataforma mexicana la termoclina mas somera (15 metros de profundidad), más profunda al centro del golfo (30 metros)

2.3.2 Profundidad

Generalmente, un difusor submarino descarga el efluente a la mayor profundidad posible, ya a que así se garantiza que existe un mayor volumen de agua para la dilución, además de que se disminuye el riesgo de que el efluente llegue a la superficie, además si el efluente alcanza la superficie, la longitud que a recorrido la pluma es mayor y por lo tanto su concentración es menor.

Si la descarga se realiza en aguas someras la pluma rápidamente llena toda la columna de agua. Cuando el efluente alcanza la superficie y el fondo, la tasa de dilución decrece, el arrastre se produce ahora solo por los lados en que la pluma está en contacto con el agua del mar, adicionalmente la pluma, puede socavar el fondo, lo cual puede conllevar a problemas de estabilidad en la tubería.

Las figuras 7, 8 y 9 muestran varios comportamientos de la pluma, de acuerdo a la profundidad a la que se realiza la descarga. En la Figura 2.9 se muestra una descarga profunda en la cual la pluma alcanza la superficie y se produce una distribución en la superficie debido a las corrientes locales.

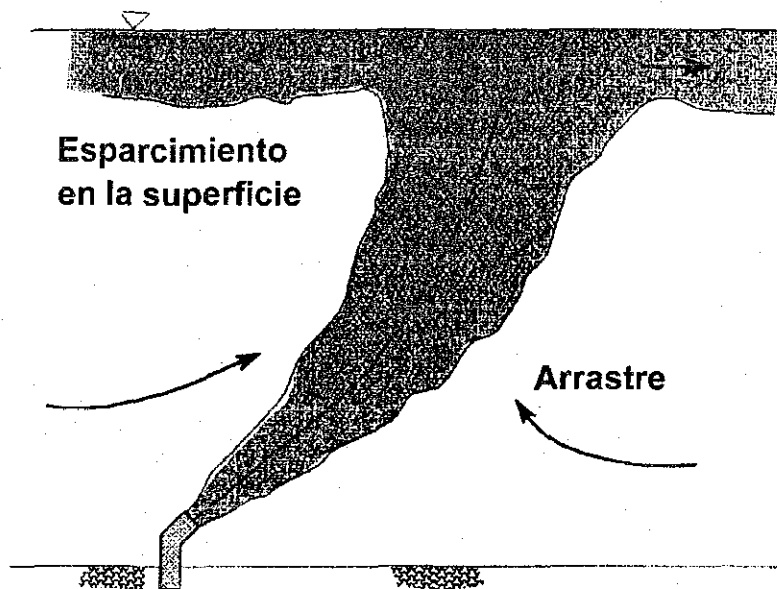


Figura 2.9. Descarga en aguas profundas con esparcimiento en la superficie

La Figura 2.10 muestra una descarga en aguas someras con muy poca corriente, la fuerte interacción con la superficie y el fondo produce un campo de flujo inestable, además, como el mismo efluente tiene el proceso de arrastre en sí mismo se produce una dilución mínima.

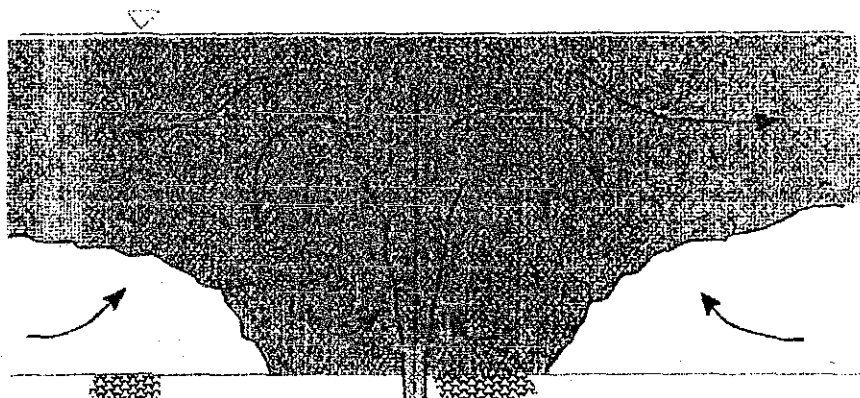


Figura 2.10. Descarga en aguas someras con campo de flujo inestable

La Figura 2.11 muestra la descarga de un emisor submarino en un río, aquí, debido a la corriente y a la cantidad de movimiento de la descarga, la pluma se dirige hacia aguas abajo debido al efecto Coanda (efecto por medio del cual una corriente, en este caso, la descarga, tiende a seguir una superficie curva, este efecto se produce cuando el ángulo entre la corriente y la superficie es pequeño, se denomina así, en honor al aerodinámico rumano Henri-Marie Coanda) la interacción entre el fondo y la pluma se produce antes de lo que se espera.

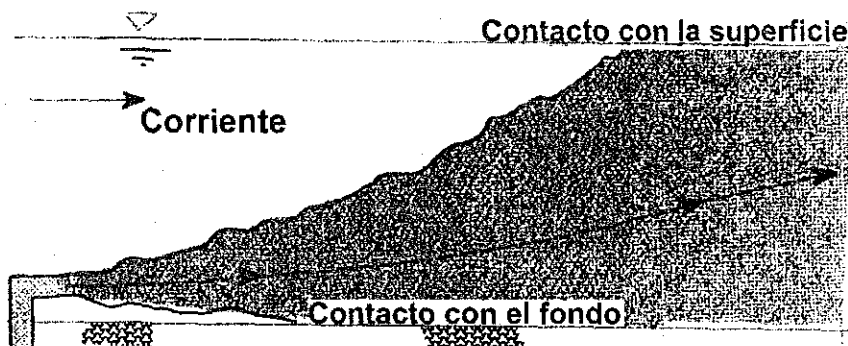


Figura 2.11. Descarga en aguas someras con interacción en el fondo y la superficie

2.3.3 Salinidad y Densidad

La característica principal que diferencia el agua de mar del agua de los ríos y lagos es que el agua de mar es salada, en gran medida la salinidad se debe al transporte de sustancias que han llevado los ríos al mar a través de millones de años.

La concentración típica de sal en el mar es de 35 gramos por cada 1000 gramos de agua, 35000 ppm (partes por millón de peso) o 35 UPS. Los principales componentes del agua de mar son: iones de cloro (55% de peso), iones de sodio (30.6% de peso), iones de SO_4 cationes de magnesio (3.7%).

En el Golfo de México, según Nowlin (1971), los contenidos mas bajos de salinidad se presentan en el norte, donde alcanzan hasta 32.16 ups en invierno y en el banco de Campeche donde varía de 26.4 a 36.6 ups, son los más altos del golfo, más aún que en el Caribe. En el Perfil vertical destaca un máximo hasta de 36.6 y 37.0 ups que identifica la masa de agua Subtropical Subsuperficial,

comprendida entre 50 y 250 metros de profundidad, esta masa penetra en el golfo de México a través del canal de Yucatán, debajo de esta última, la salinidad disminuye con 35 a 36.7 ups entre 250 y 750 metros, entre los 750 y 950 metros en promedio la salinidad se ubica entre 33.8 y 34.8 ups, entre 950 metros y el fondo se encuentra generalmente entre 34.8 y 35 ups.

La densidad se puede entender como la relación de la masa de agua por la unidad de volumen a una temperatura determinada, entre la masa por unidad de volumen de agua pura a 4°C a una presión atmosférica. La temperatura y la salinidad, debido a sus amplios intervalos de variación hacen variar, a su vez a la densidad. La densidad se representa como dependiente de ρ_{tsp} dependiente de tres factores (temperatura, salinidad y presión), este valor es adimensional y su magnitud varía a partir del tercer decimal, por lo cual se ha convenido referirla como σ , la cual se calcula con la expresión (2.13)

$$\sigma = (\rho_{tsp} - 1)1000 \tag{2.13}$$

Generalmente σ tiene un valor cercano a 25 (Grace 1978), lo cual equivale a una densidad de 1.025 g/cm³ o a una gravedad específica de 1.025, el efecto de la profundidad (presión) en σ es esencialmente de 0.1 unidades que se incrementa la densidad por cada 20 metros de aumento en la profundidad, como lo indica la Figura 2.12.

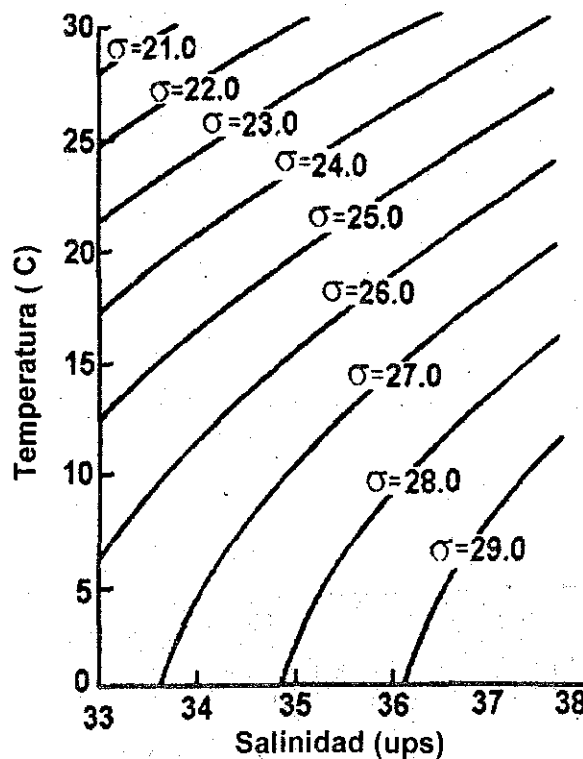


Figura 2.12. Variación de la densidad con respecto a la salinidad y la temperatura

La estratificación de la densidad del agua de mar tiene un gran efecto en el comportamiento dinámico de la pluma. La Figura 2.13 muestra el comportamiento típico de un efluente que se descarga en un ambiente estratificado, este, como se ha descrito anteriormente, se mezcla con el ambiente, la densidad de la mezcla aumenta, aproximándose a la densidad ambiental y si para alguna profundidad

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

intermedia ambas densidades son iguales, hasta ese punto llega el ascenso de la pluma, este punto se conoce como Nivel de Atrapamiento, o nivel de flotación neutra, de la pluma que ha llegado a este nivel se dice que esta "atrapada".

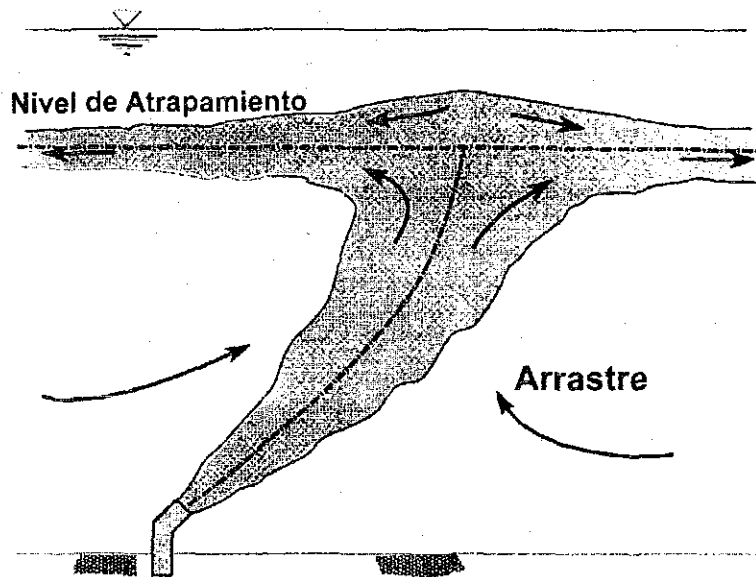


Figura 2.13. Pluma atrapada debido a la estratificación de la densidad

Se define como "Pycnoclina" a aquella capa donde la densidad del agua cambia abruptamente, este fenómeno ocurre a menudo en lagos debido a la estratificación térmica y en estuarios o regiones costeras debido a la estratificación por la salinidad.

Una vez la pluma es atrapada, la dilución decrece, por lo que la pluma se extiende en una capa y la mezcla se produce principalmente por la turbulencia ambiental y la difusión.

Las Figura 2.14 y Figura 2.15 indican la variación de la temperatura, la salinidad y la densidad en una columna de agua para el Golfo de California, se observa que, sin importar la época del año, conforme aumenta al profundidad, la temperatura y la salinidad disminuyen y la densidad aumenta.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

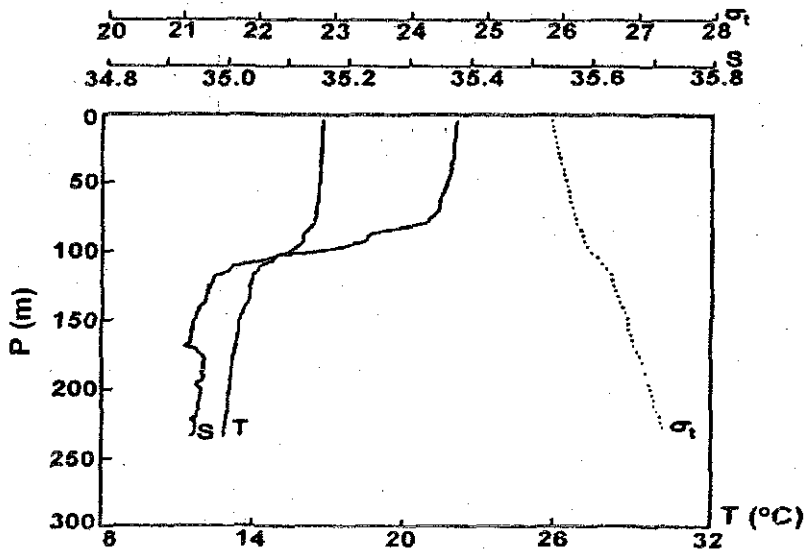


Figura 2.14 Variación de la temperatura, la salinidad y la densidad para el invierno (Lavin et al, 1999)

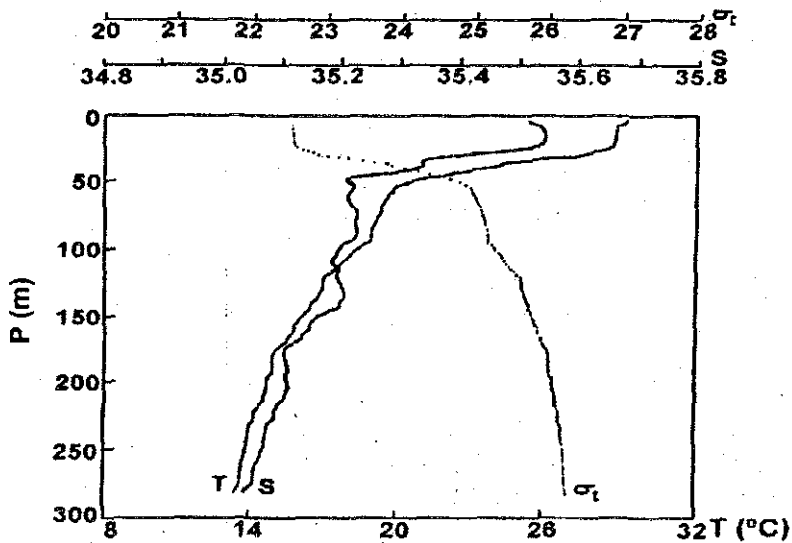
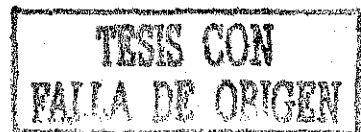


Figura 2.15 Variación de la temperatura, la salinidad y la densidad para el verano (Lavin et al, 1999)

2.3.4 Corrientes y dirección de descarga

Las corrientes siempre obligan a que la pluma se dirija en la dirección de estas, sin importar la dirección de descarga del difusor. En la Figura 2.16 y Figura 2.17 se indica el comportamiento de la pluma, para descargas verticales y horizontales, respectivamente.



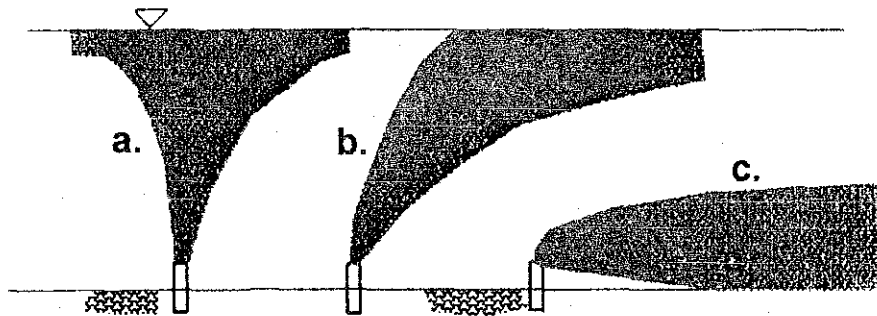


Figura 2.16. Comportamientos posibles para descargas verticales, a) poca corriente, b) corrientes moderadas, c) corrientes altas

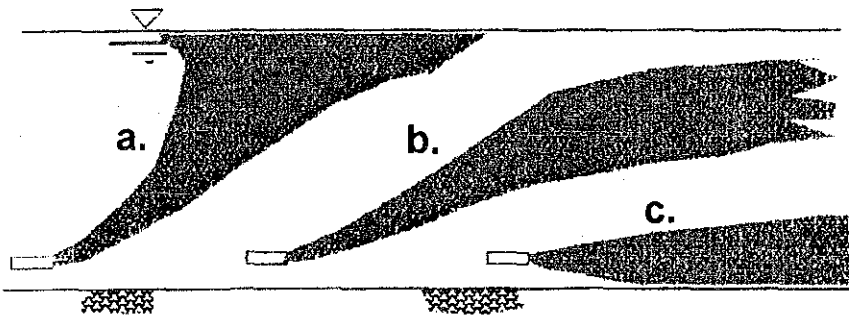


Figura 2.17. Comportamientos posibles para descargas horizontales, a) poca corriente, b) corrientes moderadas, c) corrientes altas

La interacción de la pluma con las corrientes puede utilizarse para incrementar la dilución al final de la zona de mezclado seleccionando el ángulo correcto de descarga. Los límites de estos ángulos están determinados por la profundidad del agua, ancho del río (si la descarga no se realiza en el mar) y la interacción con las plumas vecinas del difusor, como se indica en la Figura 2.18.

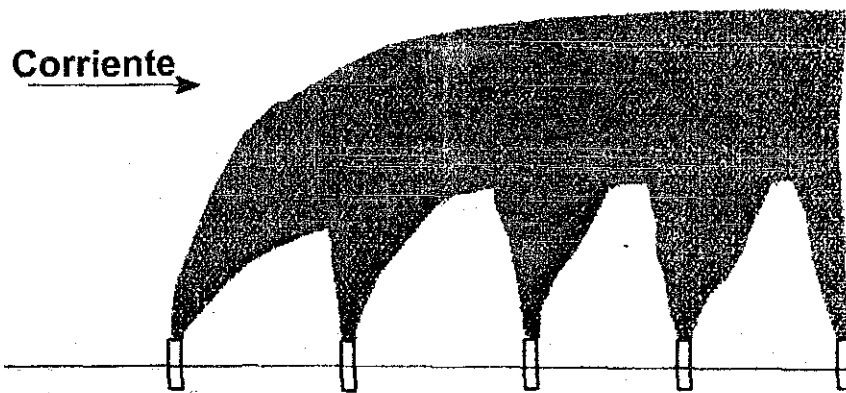


Figura 2.18. Descarga de un difusor con corriente paralela

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

En la figura anterior se observa que la descarga de aguas arriba reduce la interacción de las otras descargas, con lo cual se disminuye la dilución esperada.

Generalmente las corrientes incrementan la mezcla en la zona cercana para la mayoría de las condiciones de descarga, la peor condición se presenta cuando la magnitud de la corriente es pequeña.

2.3.5 Mareas

Las mareas producen que la profundidad y las corrientes cambien en el tiempo, además, las mareas cambian la estratificación y salinidad en las desembocaduras de ríos y en las bahías. Los efectos de las mareas no se consideran con los modelos de predicción del comportamiento de la pluma, pero para el caso del análisis de la zona de mezclado, como esta zona es pequeña, los fluidos que son descargados, rápidamente salen de esta zona y durante este intervalo de tiempo los cambios en la marea se pueden considerar despreciables.

2.4 FLUJO DENTRO DE LA TUBERÍA

La capacidad de flujo dentro de una tubería se refiere a la habilidad de ésta para transportar un volumen de agua, esta capacidad es altamente dependiente de la rugosidad de la tubería y también de factores como la longitud, el área y la pendiente.

Existen varias maneras de evaluar la rugosidad en la tubería, como son el promedio de todas las alturas de las protuberancias, el cual se representa con ϵ^* y el factor de rugosidad de Manning, n . El factor n , no se obtiene de mediciones directas sino indirectamente a partir de mediciones de la capacidad de flujo de las tuberías, para cada material se tienen diferentes n

La Tabla 2.1 ofrece los valores máximos y mínimos para el coeficiente de Manning, según el material con el cual se construye la tubería

Material	n mínimo	n Máximo
Plástico	0.009	0.011
Madera	0.010	0.013
Vitrificado	0.010	0.017
Concreto prefabricado	0.011	0.013
Hierro Fundido	0.013	0.017
Acero soldado	0.010	0.014
Arena	0.018	0.025
Grava	0.022	0.030

Tabla 2.1. Valores máximos y mínimos para el coeficiente de rugosidad de Manning (Grace 1978)

2.5 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN LOS DIFUSORES

El diseño hidráulico de un difusor es una secuencia de cálculos iterativos que son fácilmente realizados con la ayuda de un programa de computador.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El diseño debe ser tal que el flujo total del efluente este uniformemente distribuido en todos los puertos del difusor. Esto es de especial consideración, ya que al existir variaciones en los caudales descargados, en el nivel del mar se obtienen variaciones en la presión lo cual conlleva a una distribución diferente de los caudales descargados por cada puerto.

Además de la distribución de caudales se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Debe existir una velocidad adecuada dentro de la tubería que evite la depositación de los sólidos que lleva el agua residual, así ésta haya pasado por un tratamiento primario. A partir de cierto tamaño, los sólidos pasan de la planta de tratamiento al difusor, se debe garantizar una velocidad mínima sea entre 0.6 y 0.9 m/s durante los mayores flujos, para así permitir el arrastre de los sólidos que hayan podido sedimentarse durante los periodos de flujo bajo
2. Las pérdidas totales deben ser minimizadas y así evitar los requerimientos de bombeo y mantener la carga de presión lo mas alta posible. Las bombas implican gastos en energía, operación y mantenimiento
3. En todos los puertos se debe garantizar una descarga total, es decir, mientras los puertos están funcionando no puede ocurrir la intrusión de agua marina en el difusor. Para garantizar esto, Brooks (1970b) sugiere que el Número de Froude densimétrico efectivo en cada puerto sea superior a 1, también es útil utilizar válvulas tipo "Bell-Mouth", las cuales además de prevenir la intrusión de agua marina, previene la entrada de sedimentos, los cuales pueden llegar a taponar completamente la salida del difusor

Para garantizar las condiciones anteriores, según investigaciones experimentales, se debe disminuir el diámetro de la tubería en uno o más pasos mientras se incrementa la distancia recorrida por el flujo y además se garantiza que el área total de los puertos en una sección no exceda $1/2$ - $2/3$ del área de esta sección transversal.

Finalmente, no siempre es posible para garantizar el flujo igual en todos los puertos para el rango de caudales de diseño, por lo que se deben tener los mayores caudales en el más alejado de los puertos para satisfacer las consideraciones de velocidad mínima requerida.

CAPÍTULO 3 EMISORES

1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025

3 EMISORES

3.1 Conceptos

Principalmente, un emisor submarino se construye para disponer el agua residual proveniente de una planta de tratamiento en el océano, de tal manera que se realice una mezcla rápida y eficiente en una distancia lo mas corta posible, de esta manera se garantiza que la zona afectada es la mínima posible.

En la Figura 3.1 se muestra una línea típica de un emisor con la pluma de agua residual generada. Se distinguen tres zonas específicas: (1) la zona donde el flujo se establece, los perfiles cambian de forma de sombrero de copa ó rectangular a un perfiles gaussiano (2) donde se desarrollan las plumas individuales y, (3) donde las plumas se unen. En la primera región las concentraciones en el eje, la temperatura y las velocidades no cambian. En la zona de desarrollo completo del flujo las condiciones son iguales para cada pluma, como si estas estuvieran solas. La región 3 es la región en la que se fusionan las plumas lo que causa concentraciones, velocidades y temperaturas, en la interfase, que se incrementan hacia el eje de cada pluma. Cuando las plumas de cada puerto se han unido completamente se asemejan a una descarga lineal, tal y como se modelan normalmente.

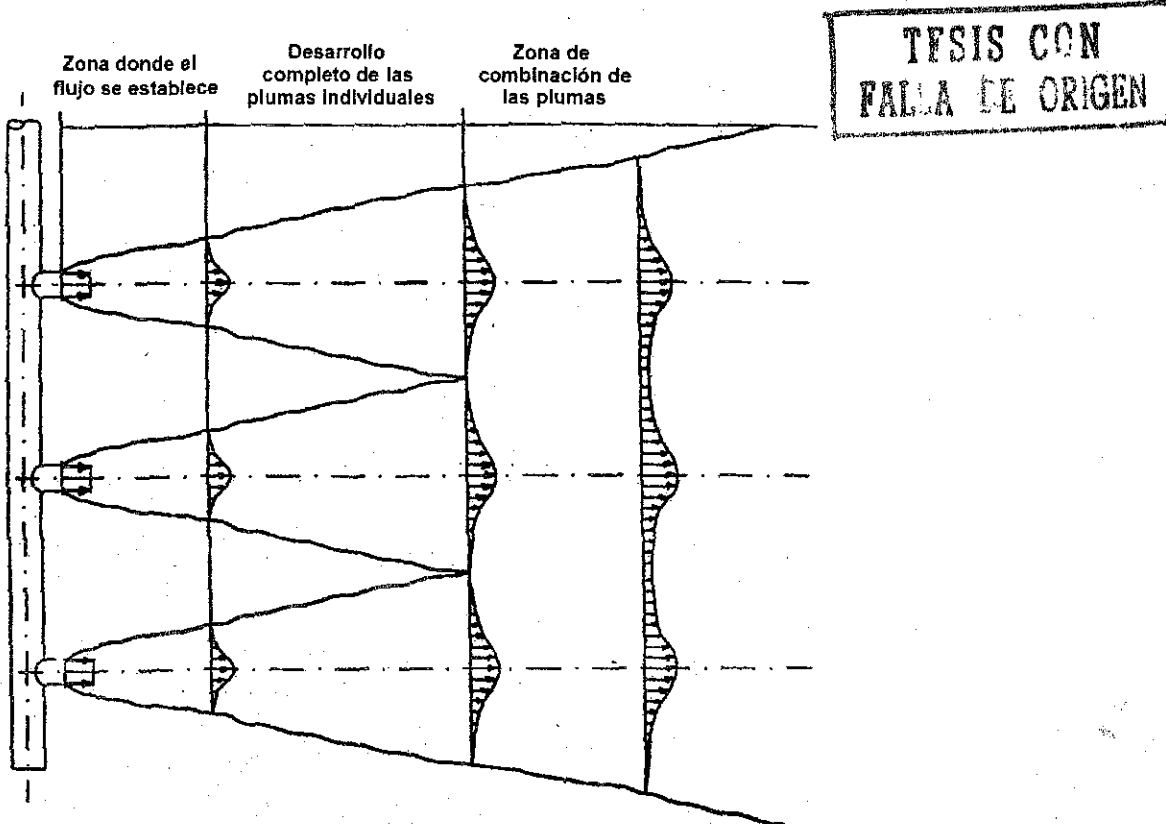


Figura 3.1. Comportamiento típico de una descarga en un emisor con múltiples puertos

Una aproximación válida para modelar el comportamiento de una descarga que se realiza a través de varios puertos es el concepto de la ranura o apertura equivalente. Con esta aproximación, la descarga

de una línea de emisores igualmente espaciados se asume como si fuera una descarga a través de una ranura con la misma longitud, caudal y cantidad de movimiento que los múltiples puertos. Este concepto es útil para analizar las características de cierto tipo de descargas. La premisa fundamental tras este concepto es que después del punto en que se mezclan las pequeñas plumas, si estas provienen de puertos igualmente espaciados se forma una sola pluma la cual es equivalente a la descarga producida por una ranura. Si el estudio intenta analizar el comportamiento de las plumas en el campo cercano, este concepto no es recomendable.

3.1.1 Geometría

Los puertos por los cuales sale la descarga pueden ser simples agujeros en un lado de la tubería principal, Figura 3.2, o ser arreglos con ductos ascendentes como se muestra en la Figura 3.3.

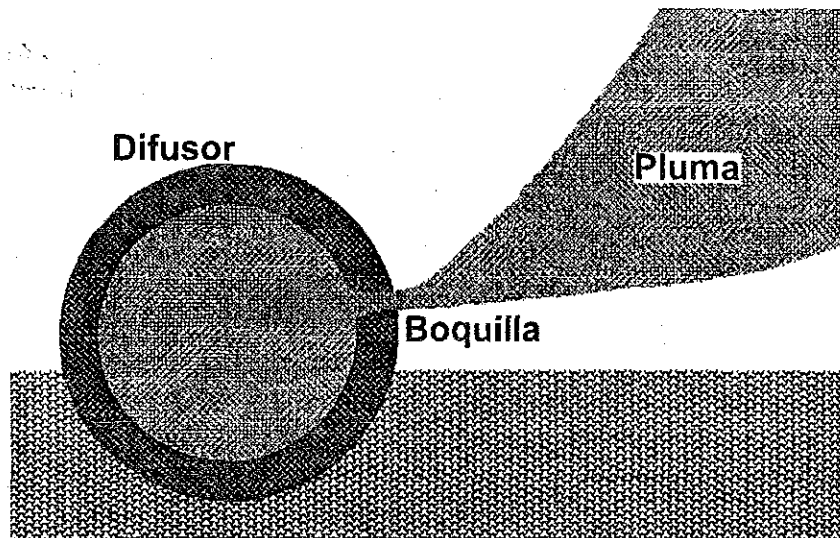


Figura 3.2. Emisor con puertos en forma de boquilla

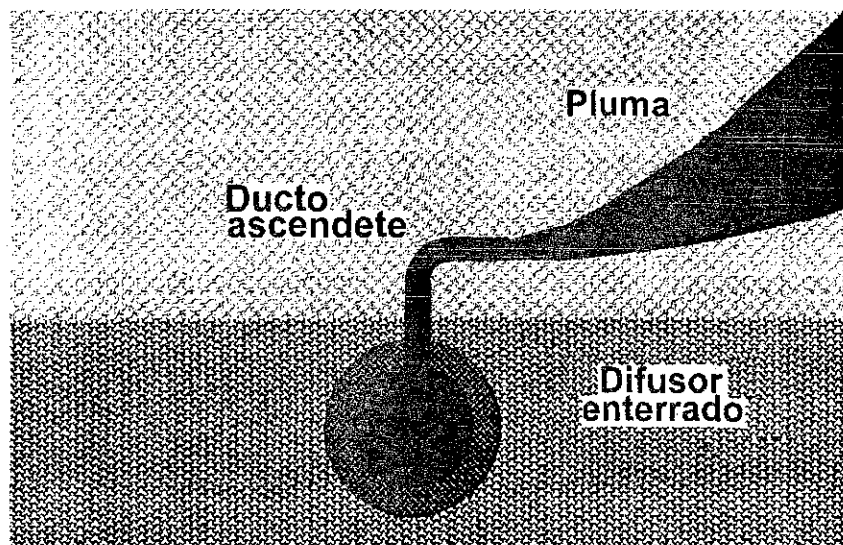


Figura 3.3. Emisor con puertos en forma de ductos ascendentes

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los puertos ascendentes pueden tener uno o varios puertos de salida, como se indica en la Figura 3.4, estos se utilizan para permitir que el punto de descarga esté por encima de la tubería principal, permitiendo que esta pueda ser enterrada o que se puedan colocar válvulas de no retorno para prevenir que cuando el flujo cambie de dirección, no se dirija hacia la planta de tratamiento.



Figura 3.4. Emisor con múltiples puertos de salida por ducto ascendente

Un gran número de pequeños puertos tienen más área de contacto con el ambiente que una sola salida por la cual pueda salir el mismo caudal. Por ejemplo, una descarga de 1 metro de diámetro tiene 3.14 metros de circunferencia, mientras que 100 puertos de 10 centímetros, los cuales tienen la misma área, equivalen a una circunferencia de 31.4 metros de diámetro, como resultado de esto la mezcla inicial puede ser aproximadamente 10 veces más rápida con los emisores que con un solo puerto de salida.

Los arreglos principales para los emisores son: unidireccional, en forma de "Y" y de puertos alternados, como se indica en la Figura 3.5. Los arreglos unidireccionales se utilizan frecuentemente en ríos, donde la corriente siempre es en la misma dirección.

Los emisores alternados tienen puertos en ambos lados de la tubería, generalmente se colocan con un ángulo de 20 grados o más con respecto a la corriente. Estos se construyen básicamente en bahías y regiones costeras donde las corrientes cambian constantemente de dirección y donde la longitud del emisor es el concepto principal

Los emisores en forma de Y y con puertos alternados además de ser más costosos y complejos de construir no necesariamente logran la mayor dilución, por lo que su utilización es poco común



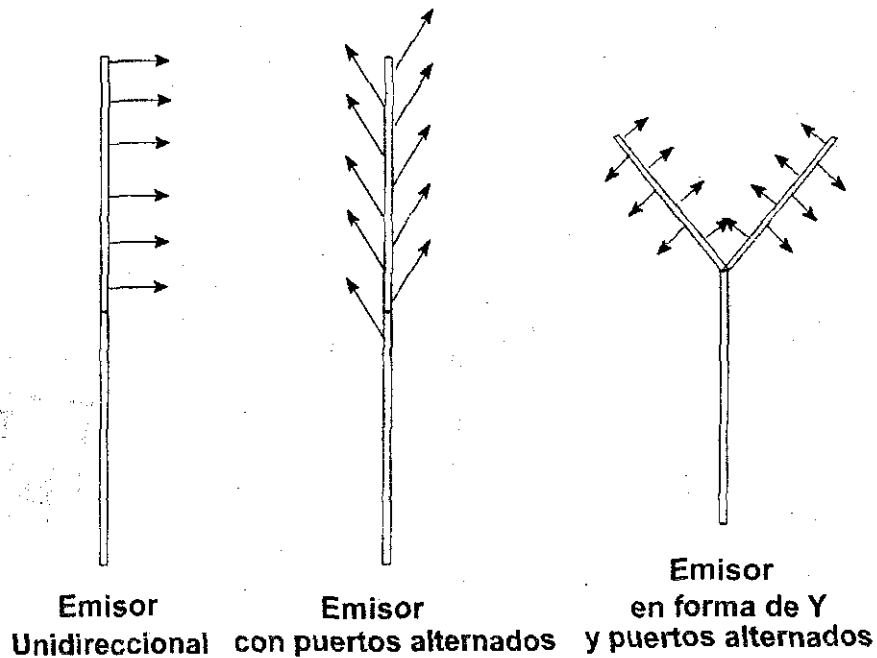


Figura 3.5. Diferentes arreglos de emisores

Los conceptos que se deben tener en cuenta al diseñar un emisor son los siguientes:

- A mayor número de puertos, se obtiene una mejor dilución.
- El diámetro mínimo de un puerto es función de la velocidad requerida a la salida del chorro, considerando las pérdidas de energía y los problemas de colmatación que se puedan presentar.
- Los puertos deben colocarse lo más cerca posible, entre más grande sea el espacio entre ellos el costo del emisor aumenta.

3.2 Ecuaciones de Energía

3.2.1 Pérdidas de energía en los emisores

Una de las consideraciones más importantes en el diseño de un emisor es la cuantificación de la pérdida total de energía y la distribución del flujo a través de cada puerto. Es deseable que las pérdidas sean mínimas con el objeto de prevenir la intrusión del agua de mar en la tubería o que haya insuficiencia de las bombas en el sistema de bombeo. A su vez la velocidad de descarga a través de los puertos debe ser lo más alta posible, de esta manera se realiza una mezcla eficiente.

Cuando las velocidades en la tubería principal son altas se mantienen el material sólido en suspensión, pero causan grandes variaciones en la presión en la tubería, lo que conlleva a una deficiente distribución del flujo en los puertos de salida. Mientras que cuando los diámetros de la tubería principal son grandes, permiten menores velocidades y una mejor distribución del flujo en los puertos, pero es más costosa, ya que el precio del emisor es directamente proporcional al diámetro de la tubería. El diseño de un emisor es, por lo tanto, un proceso iterativo en el cual se deben tener en cuenta todos los conceptos anteriores.

3.2.2 Ecuación de energía entre la tubería y un puerto

La cantidad de variables utilizadas para el cálculo de las velocidades, caudales y presiones en cada puerto de un emisor es considerable, por lo cual se adopta la siguiente convención: los puertos del emisor se numeran consecutivamente desde el final hacia el principio, se utiliza el subíndice j para este propósito, el diámetro del puerto j -ésimo es d_j y el diámetro de la tubería, el cual puede cambiar a lo largo del emisor, en este punto es D_j , las áreas se representan como a_j y A_j , respectivamente, la distancia entre los puertos es l .

El caudal que lleva la tubería aguas arriba del puerto j -ésimo es Q_j y el caudal que sale por este puerto es q_j . Las velocidades medias del flujo, son respectivamente V_j y u_j . La presión media justamente aguas arriba del puerto j es p_j . En la siguiente figura se esquematizan estas variables.

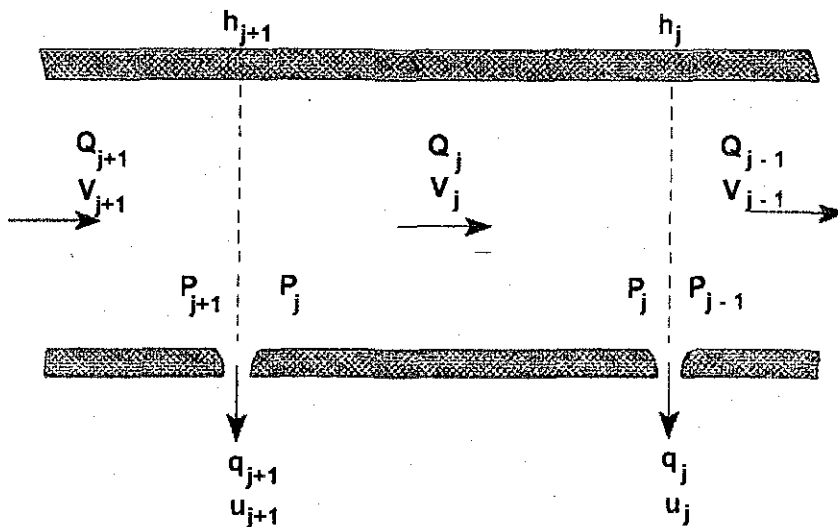


Figura 3.6. Esquema para la definición de la ecuación de energía entre dos puertos adyacentes

La altura de la columna de agua sobre el puerto j th es h_j , con el plano de referencia fijo en la superficie del mar, la elevación de cualquier puerto es $-h_j$. La presión hidrostática a esta profundidad, asumiendo que el peso específico del agua de mar permanece constante y está dado por $\gamma_a h_j$, para simplificar las variables utilizadas la presión se representa como p_{aj} , la tubería se considera horizontal.

Considerando el flujo desde dentro del puerto j -ésimo hacia fuera, la ecuación de la energía se puede escribir según Grace (1978):

$$-h_j + \frac{V_j^2}{2g} + \frac{p_j}{\gamma_d} = -h_j + \frac{u_j^2}{2g} + \frac{p_{aj}}{\gamma_d} + k_1 \frac{u_j^2}{2g} \tag{3.1}$$

Donde g es la aceleración debida a la gravedad y K_1 es un coeficiente de perdidas menores. El último término de la ecuación (3.1) representa la carga por pérdidas locales la cual puede escribirse como:



$$u_j = \sqrt{\frac{1}{1+k_1} 2g \cdot E_j} \quad (3.2)$$

donde

$$E_j = \frac{P_j - P_{aj}}{\gamma_d} + \frac{V_j^2}{2g} \quad (3.3)$$

La ecuación (3.3) es una medida de la carga neta de energía disponible.

Aplicando la ecuación de continuidad para el puerto j -ésimo, se obtiene

$$q_j = C_j' a_j u_j \quad (3.4)$$

Donde C_j' es el coeficiente de contracción, combinando las ecuaciones anteriores y utilizando un coeficiente de descarga, se obtiene:

$$C_j = \frac{C_j'}{\sqrt{1+k_1}} \quad (3.5)$$

$$q_j = C_j a_j \sqrt{2g \cdot E_j} \quad (3.6)$$

Según Brooks 1970, la ecuación empírica para C_j' si el puerto es con bordes redondeados es:

$$C_j = 0.975 \left(1 - \frac{V_j^2}{2gE_j} \right)^{3/8} = 0.975 (1-J)^{3/8} \quad (3.7)$$

para un puerto que termina en con bordes afilados es:

$$C_j = 0.63 - 0.58 \frac{V_j^2}{2gE_j} \quad (3.8)$$

Esta ecuación es aplicable sólo para una relación de contracción para el puerto mayor o igual a 4:1 y para $d_j < 0.1D_j$. Como V_j y E_j son diferentes para puertos con otras características, C_j se espera que cambie a lo largo del emisor.

Para calcular las variables en cada puerto, por tratarse de un proceso iterativo, solo se deben conocer las variables en el puerto inmediatamente anterior.

3.2.3 Ecuación de la energía para un segmento de la tubería

La ecuación de la energía para el segmento j -ésimo puede escribirse según Grace (1978).

$$h_{j+1} + \frac{V_j^2}{2g} + \frac{p_j'}{\gamma_d} = h_j + \frac{V_j^2}{2g} + \frac{p_j}{\gamma_d} + h_{lj} \quad (3.9)$$

y operando, (3.9) se convierte en:

$$h_{j+1} + \frac{p_j'}{\gamma_d} = h_j + \frac{p_j}{\gamma_d} + h_{lj} \quad (3.10)$$

El último término del lado derecho de (3.10), es la pérdida de carga, inicialmente desconocida. Los términos que se conocen en esta ecuación son h_{j+1} , h_j y p_j/γ_d , la pérdida de carga puede calcularse con la siguiente ecuación

$$h_{lj} = f_j \frac{l}{D_j} \frac{V_j^2}{2g} \quad (3.11)$$

donde el coeficiente f_j es el factor de fricción de Darcy-Weisbach, el cuál a su vez es función de la rugosidad relativa de la tubería y del número de Reynolds, los cuales se calculan con las ecuaciones (3.12) y (3.13), respectivamente

$$R_{rel} = \frac{\varepsilon_*}{D_j} \quad (3.12)$$

$$R_j = \frac{V_j D_j}{\nu} \quad (3.13)$$

donde ε es la altura promedio de las rugosidades, en m y ν es la viscosidad cinemática, en m²/s.

Para determinar f_j , conocida la rugosidad relativa y el número de Reynolds, se puede utilizar el diagrama de Moody o la ecuación de Colebrook-White. Una vez conocido f_j se determina la pérdida de carga y p_j'/γ_d se obtiene de la ecuación (3.10).

La ecuación de Swamee-Jain se aproxima a los factores de fricción obtenidos con el diagrama de Moody, la ventaja es que con dicha ecuación, (3.14), se puede calcular la pérdida de energía directamente, la ecuación es:

$$h_{lj} = \frac{0.203 \frac{Q^2}{dD^5} L}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{R_j^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.14)$$

donde Q es el caudal en m³/s, L es la longitud del segmento de tubería donde se desean calcular las pérdidas, en m.

Los valores obtenidos con la ecuación (3.14) tienen una diferencia cercana al 1.0% con respecto a los obtenidos con la ecuación de Colebrook-White.

Es aceptable, si se analiza el flujo de un emisor, que la carga total se mantiene constante cuando el flujo pasa por un puerto, si se considera la Figura 3.6, se puede escribir:

$$\frac{V_{j+1}^2}{2g} + \frac{P_{j+1}}{\gamma_d} = \frac{V_j^2}{2g} + \frac{P_j}{\gamma_d} \quad (3.15)$$

Donde los términos del lado derecho son conocidos. Comparando los términos de la parte derecha de la ecuación (3.3) con los de la parte izquierda de la ecuación (3.15) se observa que para una presión hidrostática conocida $P_{a_{j+1}}$ afuera del puerto $(j+1)$, E_{j+1} es conocida. Sin embargo $V_{j+1}^2/2g$ no es conocido, y este término es requerido para calcular C_{j+1} en las ecuaciones (3.7) o (3.8).

En la primera iteración $V_j^2/2g$ puede ser usado en lugar de $V_{j+1}^2/2g$ en las ecuaciones (3.7) o (3.8) según sea el caso para determinar una primera aproximación de C_{j+1} , luego se obtiene un primer valor de q_{j+1} con la ecuación (3.6), posteriormente se calcula Q_{j+1} con:

$$Q_{j+1} = Q_j + q_{j+1} \quad (3.16)$$

Una primera aproximación de V_{j+1} puede obtenerse con la ecuación de continuidad:

$$V_{j+1} = \frac{Q_{j+1}}{\frac{\pi}{4} D_{j+1}^2} \quad (3.17)$$

Ahora ya se tiene un nuevo valor de V_{j+1} y este se utiliza para repetir el proceso otra vez, hasta un error lo suficientemente pequeño que permita que el valor de 2 iteraciones sea igual. Generalmente el caudal que sale por el puerto q_j es pequeño, por lo que con la primera iteración es suficiente

El proceso descrito anteriormente se realiza para todo el emisor, empezando en el puerto más lejano, donde, para los cálculos iniciales se debe asumir un valor de E_j , que se utiliza en las ecuaciones (3.7) o (3.8). Para el primer puerto, se debe cumplir:

$$Q_1 = q_1 \quad (3.18)$$

La descarga total del emisor se comprueba como la suma de todas las descargas de los puertos $Q=Q_N$ se deben revisar las condiciones descritas anteriormente, además si la suma de todas las áreas de los puertos aguas abajo de cierta estación excede la mitad del área de esta sección, se debe incrementar el diámetro de la tubería

3.2.4 Modelo PLUMEHYD

El modelo *PLUMEHYD* se utiliza para conocer el flujo a través de cada uno de los puertos, este programa se basa en el modelo hidráulico DPHYDR utilizado por Tetar Tech en los 80's. Este programa es apropiado para el uso en emisores con múltiples puertos ya sea con bordes afilados o redondeados, también se pueden considerar variaciones del diámetro. Este programa utiliza el sistema métrico SI.

Los puertos en forma afilada causan una constricción dinámica en el diámetro de la pluma a una corta distancia del puerto lo que incrementa el número Froude densimétrico de la descarga

3.3 INTERACCIÓN SUELO-TUBERÍA

Principalmente, la fricción equivalente esta basada en la fricción de Coulomb (para suelos friccionantes como arena), en la cohesión (para suelos arcillosos) es una combinación de las anteriores para suelos que tienen parte de arena y arcilla, también es función de la densidad del suelo, y la presión de contacto entre la tubería y el suelo, es por lo tanto importante predecir acertadamente la presión de contacto, la fricción equivalente y la rigidez del suelo

3.3.1 Asentamiento de una tubería

La penetración o asentamiento que sufre una tubería cuando se encuentra apoyada sobre el suelo es función del diámetro de la tubería, la presión vertical de contacto, los parámetros de esfuerzos del suelo, el esfuerzo cortante sin drenar para arcillas, el ángulo de fricción interna para arenas y la densidad sumergida del suelo.

Para determinar el asentamiento de una tubería se pueden utilizar los métodos de la American Gas Association, de Verly y Lund (1995) y el método de la flotación de Haland, 1997, es importante tener en cuenta que estos métodos son una aproximación, donde los efectos cíclicos en el suelo son ignorados.

3.3.2 SUELOS FRICCIONANTES

3.3.2.1 Deformación volumétrica del suelo

El proceso que experimenta un suelo que está sometido a cargas, se deforma y reduce su volumen recibe el nombre de consolidación. Este fenómeno se considera unidimensional, ya que la posición de las partículas del suelo, en el sentido horizontal, no se altera, contrario a la dirección vertical, donde se produce el movimiento.

Las deformaciones del suelo ocurren tanto a corto como a largo plazo, la primera es del tipo elasto-plástica y ocurre tan pronto como se aplica la carga. La segunda es producida por la consolidación el suelo, es decir es debida a la aplicación de cargas de larga duración y se distinguen dos tipos, la consolidación primaria y la secundaria.

La consolidación primaria ocurre en suelos finos plásticos, de baja permeabilidad, la consolidación secundaria es posterior a la primaria y se debe al desplazamiento progresivo diferido en el tiempo entre las partículas del suelo que se reacomodan.

El asentamiento del fondo debido al incremento de carga, se expresa como:

$$\Delta H = \Delta H_e + \Delta H_p + \Delta H_s \quad (3.19)$$

Donde ΔH = Asentamiento total.

ΔH_e = Asentamiento elástico

ΔH_p = Asentamiento por consolidación primaria

ΔH_s = Asentamiento por consolidación secundaria

Quando se trata el caso particular de una tubería sumergida, la deformación elástica se produce durante el proceso de instalación y pruebas de la tubería antes de ser operada. Los demás asentamientos ocurren durante el periodo de vida útil, en el que la tubería tiende a enterrarse hasta una profundidad donde la capacidad de carga del suelo sea mayor a la carga impuesta por la tubería. La capacidad de carga es función del área de contacto entre la tubería y el suelo, el peso unitario del suelo, la profundidad de enterramiento y las cargas aplicadas.

3.3.2.2 Método American Gas Association

Para estimar la capacidad de carga del suelo como respuesta a la carga impuesta por una tubería, en el documento de la AGA- PR 178-156, se propone la siguiente expresión.

$$q_f = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + c N_c + d \gamma N_q \tag{3.20}$$

El primer término de la ecuación (3.20) considera la componente friccional del suelo, el segundo la cohesión y el tercero es función del enterramiento de la tubería, los factores N_γ , N_c , N_q son adimensionales y están en función del ángulo de fricción interna del suelo.

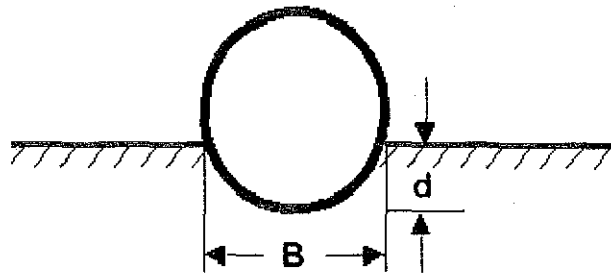


Figura 3.7. Parámetros para la ecuación (3.20)

Para calcular los coeficientes N_γ y N_q se pueden utilizar las siguientes expresiones

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left(N_\phi^{\frac{5}{2}} - N_\phi^{\frac{1}{2}} \right) \tag{3.21}$$

$$N_\gamma = N_\phi^2 \tag{3.22}$$

$$N_\phi = \frac{1 + \text{sen} \phi}{1 - \text{sen} \phi} \tag{3.23}$$

Si se analiza la tubería por metro lineal, se tiene que el factor N_c es equivalente a la siguiente expresión

$$N_c = 5(1 + 0.2 \times B) \tag{3.24}$$

Para suelos arenosos, la ecuación del asentamiento (3.19) se transforma en:



$$\Delta H = \Delta H_e \quad (3.25)$$

Además, como la cohesión es cero y no se presenta consolidación secundaria, la ecuación para calcular la capacidad de carga se convierte en

$$q_f = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (3.26)$$

3.3.2.3 Método de Verly y Lund

Este método es aplicable a tuberías con diámetro externo que se encuentren entre 0.2 y 1.0 metros, apoyadas sobre arcilla con esfuerzo cortante sin drenar entre 0.8 y 70 kPa, la ecuación (3.27) se utiliza para calcular el asentamiento

$$\frac{z}{D} = 0.0071 \cdot (S \cdot G^{0.3})^{3.2} + 0.062 \cdot (S \cdot G^{0.3})^{0.7} \quad (3.27)$$

donde

$$S = \frac{F_C}{D \cdot s_u} \quad (3.28)$$

$$G = \frac{s_u}{D \cdot \gamma} \quad (3.29)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (3.30)$$

z es la penetración en el suelo (m), F_C Fuerza vertical (Kn/m), D , Diámetro exterior (m), s_u esfuerzo cortante sin drenar (kPa), γ_s , peso específico del suelo (kg/m³) y γ es el peso específico del agua de mar (kg/m³).

La formulación de Verley y lund (1995) es aplicable para $S \cdot D^{0.3} < 2.5$

Para valores muy grandes este método sobreestima el valor de la penetración

Una formulación alterna (lineal) la cual es válida para todos los valores de $S \cdot D^{0.3}$ es

$$\frac{z}{D} = 0.009 \cdot (S \cdot G^{0.3}) \quad (3.31)$$

3.3.2.4 Método Clásico

El método clásico para la determinación de la penetración de una tubería se desarrolló inicialmente para cimentaciones rectangulares, según Bai Yóng (2001), las expresiones que se utilizan son

$$\frac{z}{D} = 0.5 \cdot \left(1 - \left(1 - 4 \cdot \left(\frac{(\beta + 0.5) \cdot \psi}{2 \cdot (\beta + 0.5 \cdot \psi^3)} \right)^2 \right)^{0.5} \right) \quad (3.32)$$

$$\psi = \frac{\alpha}{0.5 \cdot (\beta + 0.5)} \quad (3.33)$$

$$\alpha = \frac{F_c}{2 \cdot \gamma \cdot D^2} \quad (3.34)$$

$$\beta = \frac{N_c \cdot s_u}{\gamma \cdot D} \quad (3.35)$$

donde N_c es el factor de capacidad de carga, el cual tiene el valor de 5.14 para fundaciones largas, como se supone una tubería

3.3.3 SUELOS COHESIVOS

3.3.3.1 Método de la Flotación

Este método se utiliza exclusivamente para tuberías que se colocan sobre arcillas muy suaves, se asume que el suelo no resiste esfuerzos y se comporta como un fluido (Bai Yong (2001)). Se supone que la flotación que el suelo induce a la tubería es igual a la fuerza vertical de contacto, las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$B = 2 \cdot \sqrt{D \cdot z - z^2} \quad (3.36)$$

$$A_s = \frac{z}{6B} \cdot (3z^2 + 4B^2) \quad (3.37)$$

$$O = A_s \cdot L \cdot \gamma \quad (3.38)$$

donde, B es el ancho de la tubería que esta en contacto con el suelo, en m, A_s es el área de la sección transversal que penetra en el suelo y O es la flotación.

3.3.4 Fuerzas de Rotura

La fuerza de rotura es la máxima fuerza que se necesita para mover, sobre el fondo marino, una tubería desde una posición estable. Esta fuerza puede ser mucho más grande que la fuerza necesaria para mantener la tubería en movimiento, para ilustrar este fenómeno ver la Figura 3.8.

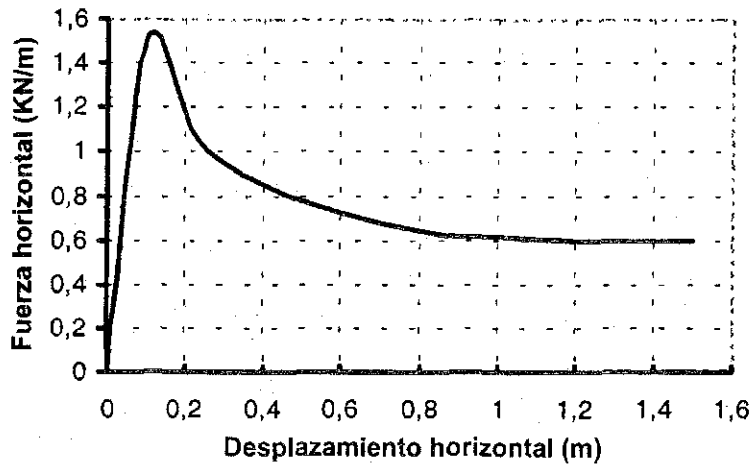


Figura 3.8. Fuerza Horizontal vs. desplazamiento lateral

Brennoddeñ (1991) presenta las ecuaciones (3.39) y (3.40) para calcular la máxima fuerza de rompimiento tanto en la dirección axial $F_{a,max}$ como lateral, $F_{l,max}$

$$F_{a,max} = 1.05 \cdot A_{c,calc} \cdot s_u \tag{3.39}$$

$$F_{l,max} = 0.8 \cdot \left(0.2 \cdot F_C + \frac{1.47 \cdot s_u \cdot A_{c,calc}}{D} \right) \tag{3.40}$$

$$A_{c,calc} = 2 \cdot R \cdot a \cos \left(1 - \frac{z}{R} \right) \tag{3.41}$$

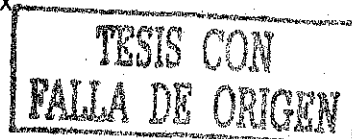
Donde F_C es la fuerza vertical de contacto, kN/m, z , es la penetración en el suelo calculada con cualquiera de los métodos anteriores, en m, s_u es el esfuerzo cortante sin drenar en kPa.

3.4 HIDRODINÁMICA ALREDEDOR DE UNA TUBERÍA

Diversos estudios se han realizado para identificar cual es la teoría de onda más aceptable para representar matemáticamente la cinemática debido a la acción del oleaje cerca al fondo. Dean *et al* (1986) concluyen que la teoría lineal provee una buena predicción de la cinemática cerca al fondo para un amplio rango de profundidades relativas y peraltes de ola, una razón para esto es que la influencia de no linealidades que se consideran en teorías de un orden superior es poca para profundidades inferiores a la superficie libre. Kirkgoz (1986) también encontró que la teoría lineal genera buenas predicciones en las velocidades de las partículas cercanas al fondo para oleaje cerca al punto de rompiente. Por esto es apropiado utilizar la teoría lineal o de primer orden para determinar el perfil de velocidades cerca de objetos que se encuentran cerca del fondo marino para un amplio rango de profundidades, periodos y altura de ola.

3.4.1 Formulaciones matemáticas

La Figura 3.9 muestra los parámetros usados en la teoría lineal para una ola en 2 dimensiones que se propaga sobre la dirección positiva del eje x



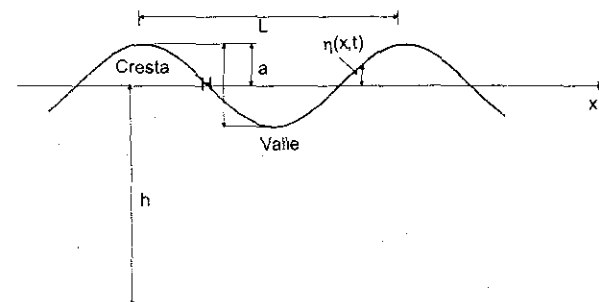


Figura 3.9. Variables usadas para la teoría lineal

- donde
- L, longitud de ola, en m
 - H, altura de ola, en m
 - A, amplitud de ola (H/2), en m
 - T, periodo de la ola, en s
 - h., nivel medio del mar, en m
 - g, aceleración de la gravedad, en m²/s
 - t, tiempo, en s

La ecuación para la superficie libre esta dada por la ecuación (3.42)

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \tag{3.42}$$

La cual está asociada a un potencial de velocidades

$$\Phi(x, z, t) = \Re \left[-\frac{ig}{\sigma} a \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{-i(kx - \sigma t)} \right] \tag{3.43}$$

Donde k, el número de onda y σ , la frecuencia angular se calculan con $k = 2\pi/L$ y $\sigma = 2\pi/T$, respectivamente

A continuación, se presentan las ecuaciones en función de la profundidad relativa, la Tabla 3.1 para aguas poco profundas, la Tabla 3.2 para aguas profundas, y por último; la Tabla 3.3 con las ecuaciones correspondientes a la solución exacta, que son las que se utilizan en aguas intermedias. Es importante aclarar que el emisor puede descargar en cualquiera de las tres condiciones.

Longitud de onda	$L = T\sqrt{gh}$
Celeridad	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gh}$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Celeridad de grupo	$C_g = C = \sqrt{gh}$
Velocidad de las partículas: Horizontal	$u = a\sqrt{\frac{g}{h}} \cos(kx - \sigma)$
Vertical	$w = a\sigma\left(1 + \frac{z}{h}\right) \sin(kx - \sigma)$
Aceleración de las partículas: Horizontal	$a_x = a\sigma\sqrt{\frac{g}{h}} \sin(kx - \sigma)$
Vertical	$a_z = -a\sigma^2\left(1 + \frac{z}{h}\right) \cos(kx - \sigma)$
Desplazamiento de las partículas: Horizontal	$\zeta = -a\sigma\sqrt{\frac{g}{h}} \sin(kx - \sigma)$
Vertical	$\xi = a\left(1 + \frac{z}{h}\right) \cos(kx - \sigma)$
Presión total (hidrostática + dinámica)	$p = -\rho gz + \rho g \eta$
Flujo de energía	$\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2\right) \sqrt{gh}$

Tabla 3.1. Resumen de las características del oleaje en aguas poco profundas ($kh < \pi/10$)

Longitud de onda	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$
Celeridad	$C = \frac{gT}{2\pi}$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Celeridad de grupo	$C_g = \frac{C}{2}$
Velocidad de las partículas: Horizontal	$u = a\sigma e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$
Vertical	$w = a\sigma e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$
Aceleración de las partículas: Horizontal	$a_x = a\sigma^2 e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$
Vertical	$a_z = -a\sigma^2 e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$
Desplazamiento de las partículas: Horizontal	$\zeta = -ae^{kz} \sin(kx - \sigma t)$
Vertical	$\xi = ae^{kz} \cos(kx - \sigma t)$
Presión total (hidrostática + dinámica)	$p = -\rho g z + \rho g \eta e^{kz}$
Flujo de energía	$\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2\right) \frac{1}{2} C$

Tabla 3.2. Resumen de las características del oleaje en aguas profundas ($kh > \pi$)

Longitud de onda	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh)$
Celeridad	$C = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh)$
Celeridad de grupo	$C_g = nC = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right)$
Velocidad de las partículas: Horizontal	

Vertical	$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{agk \cosh k(h+z)}{\sigma \cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$ $w = \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{agk \sinh k(h+z)}{\sigma \cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$
Aceleración de las partículas: Horizontal	$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = agk \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$
Vertical	$a_z = \frac{\partial w}{\partial t} = -agk \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$
Desplazamiento de las partículas: Horizontal	$\zeta = \int u dt = -a \frac{gk \cosh k(h+z)}{\sigma^2 \cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$
Vertical	$\xi = \int w dt = a \frac{gk \sinh k(h+z)}{\sigma^2 \cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$
Presión total (hidrostática + dinámica)	$p = -\rho gz + \rho ga \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$
Flujo de energía	$\bar{F} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2\right) \frac{\sigma}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right]$

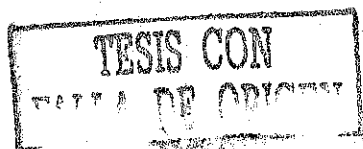
Tabla 3.3. Resumen de las características del oleaje en aguas intermedias ($\pi/10 < kh < \pi$)

Cuando el oleaje se propaga sobre una corriente uniforme, el potencial de velocidades es (3.44), según Dean y Dalrymple (1984), esta dado por:

$$\phi = -U_0 x + \frac{ga \cosh k(h+z) \cos(kx - \sigma t)}{\sigma(1 - U_0/c) \cosh kh} \tag{3.44}$$

donde U_0 es la velocidad de la corriente, en m/s. Las características del oleaje propagándose sobre una corriente se presentan en la Tabla 3.4

Longitud de onda	$L = \frac{gT^2 \tanh(kh)}{2\pi \left(1 - \frac{U_0 k}{\sigma} \right)}$
------------------	---



Celeridad	$C = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k}$
Velocidad de las partículas: Horizontal Vertical	$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = U_0 + \frac{agk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\left(1 - \frac{U_0}{C}\right) \cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$ $w = \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{agk}{\sigma} \frac{\sinh k(h+z)}{\left(1 - \frac{U_0}{C}\right) \cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$
Aceleración de las partículas: Horizontal Vertical	$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = agk \frac{\cosh k(h+z)}{\left(1 - \frac{U_0}{C}\right) \cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$ $a_z = \frac{\partial w}{\partial t} = -agk \frac{\sinh k(h+z)}{\left(1 - \frac{U_0}{C}\right) \cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$
Desplazamiento de las partículas: Horizontal Vertical	$\zeta = \int u dt = -\frac{agk}{\sigma^2} \frac{\cosh k(h+z)}{\left(1 - \frac{U_0}{C}\right) \cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$ $\xi = \int w dt = \frac{agk}{\sigma^2} \frac{\sinh k(h+z)}{\left(1 - \frac{U_0}{C}\right) \cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$
Presión total (hidrostática dinámica)	$p = -\rho g z + \rho g a \frac{\cosh k(h+z)}{\left(1 - \frac{U_0}{C}\right) \cosh kh} \sin(kx - \sigma t)$

Tabla 3.4. Resumen de las características del oleaje en aguas intermedias para oleaje con corriente ($\pi/10 < kh < \pi$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

3.4.2 Fuerzas Hidrodinámicas

Una tubería expuesta al oleaje experimenta fuerzas hidrodinámicas debido a los efectos combinados del incremento de las velocidades sobre la tubería y la separación del flujo sobre la superficie de la tubería. En la Figura 3.10 se muestra la distribución de velocidades alrededor de la tubería.

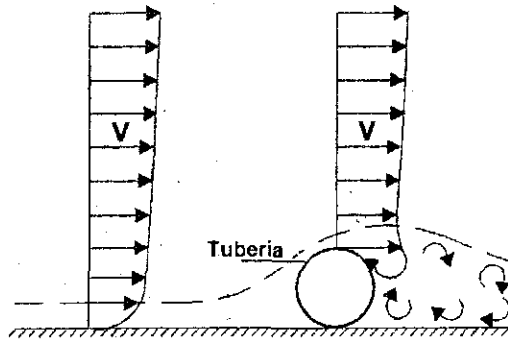


Figura 3.10. Campo de velocidades alrededor de una tubería

3.4.3 Diagrama de Fuerzas Actuantes.

Las fuerzas a las que está sometida una tubería submarina son debidas al oleaje y las corrientes, estas fuerzas son la de sustentación, F_L , arrastre, F_D , inercia, F_M , peso sumergido de la tubería, peso del contenido de la tubería, W y Fuerza de fricción F_{Rf} , Fuerza normal, N , entre el fondo marino y la tubería. La Figura 3.11 representa el diagrama de fuerzas actuante sobre una tubería

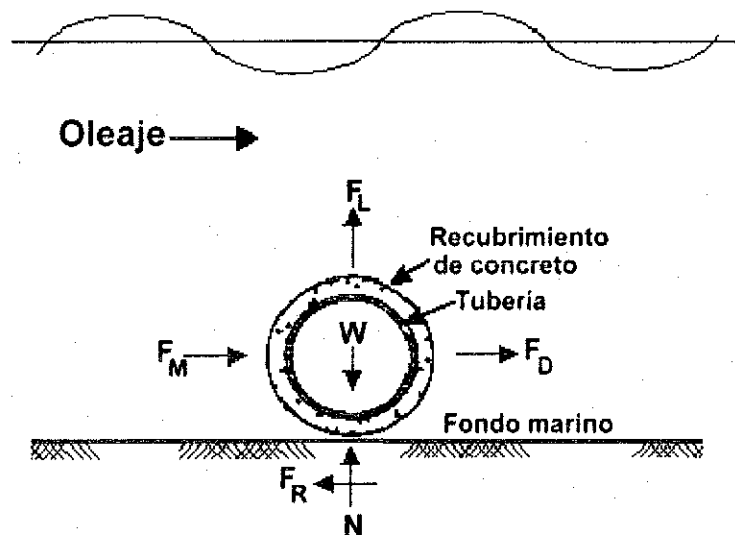


Figura 3.11. Diagrama de Fuerzas actuantes en una tubería

Estas fuerzas son de difícil cuantificación por ser un fenómeno bastante complejo, Morison et al (1950) propone la ecuación (3.45) la cual esta expresada en su forma general

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$F_{IL(t)} = \frac{1}{2} \rho C_D \left(U - \frac{\partial y}{\partial t} \right) \left| U + \frac{\partial y}{\partial t} \right| + C_M \frac{\pi}{4} \rho D^2 a - (C_M - 1) \frac{\pi}{4} \rho D^2 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3.45)$$

donde ρ es la densidad del agua de mar en $\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$, D , diámetro exterior, en m, U , velocidad en m/s, a es la aceleración en m / s^2 , C_D es el coeficiente de arrastre el cual es adimensional y es variable de acuerdo a las condiciones del flujo, C_M Coeficiente de inercia.

3.4.4 Fuerza Horizontal Instantánea

Para calcular la fuerza horizontal instantánea inducida por el oleaje, sin considerar rotura, la cual está compuesta por una fuerza de arrastre y otra de inercia se utiliza

$$F = F_D + F_M \quad (3.46)$$

Donde F_i es la fuerza horizontal por unidad de longitud, F_D es la fuerza de arrastre por unidad de longitud y F_M es la fuerza de inercia en las mismas unidades.

3.4.4.1 Fuerza de Arrastre

La fuerza de arrastre esta asociada a la velocidad total, es decir, la suma de la velocidad correspondiente a corrientes y al oleaje, esta fuerza esta dada por unidad de longitud y se calcula con:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho D |U| U \quad (3.47)$$

donde U es la velocidad total de una partícula sobre el eje de la tubería, en m, ρ , es la densidad del fluido en $\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$, D , el diámetro de la tubería, en m, y C_D el coeficiente de arrastre adimensional.

La fuerza de arrastre es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad en condiciones de flujo estable, en flujo oscilatorio se utiliza el valor absoluto de la velocidad para garantizar que la fuerza tiene la misma dirección de la velocidad.

3.4.4.2 Fuerza de Inercia

En caso de flujo oscilatorio, se tiene una fuerza adicional a la fuerza total del flujo que se denomina fuerza de inercia.

La fuerza de inercia se produce por la aceleración y desaceleración de las partículas alrededor de la tubería, lo cual provoca un momento alrededor de éste, el cual a su vez produce la fuerza de inercia, esta fuerza tiene la misma dirección del flujo y se calcula con la expresión siguiente:

$$F_M = \frac{\pi}{4} C_M \rho D^2 a \quad (3.48)$$

donde a , es la aceleración una partícula en el eje de la tubería en m / s^2 , ρ es la densidad del fluido en $\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$, D , es el diámetro de la tubería, en m, y C_M el coeficiente de inercia adimensional

3.4.4.3 Fuerza de Sustentación

La tubería experimenta una fuerza de sustentación, en sentido perpendicular a la fuerza horizontal. Esta fuerza está directamente relacionada con el movimiento de los vórtices generados por el flujo alrededor de la tubería, el cálculo se realiza con la siguiente ecuación

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho D U^2 \quad (3.49)$$

donde U es la velocidad de la partícula en m/s, ρ , es la densidad del fluido en $\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$, D , es el diámetro de la tubería, en m, y C_L el coeficiente de sustentación, adimensional

3.4.4.4 Fuerza Normal

Esta fuerza se opone al movimiento, es la diferencia entre el peso total de la tubería y la fuerza de sustentación.

$$N = W - F_L \quad (3.50)$$

3.4.4.5 Fuerza de fricción

Esta es una fuerza que se opone a las fuerzas de arrastre e inercia, por lo tanto al movimiento de la tubería, se utiliza la expresión (3.51) para calcularla

$$F_R = \mu N \quad (3.51)$$

donde μ es el coeficiente de fricción entre la tubería y el suelo del mar

3.4.4.6 Valores de los Coeficientes C_D , C_M y C_L

Por medio del análisis dimensional, los coeficientes de arrastre e inercia dependen de:

$$C_D = f\left(R_e, KC, \alpha, \frac{e}{D}, \frac{k}{D}, \frac{A_z}{D}\right) \quad (3.52)$$

$$C_M = f\left(R_e, KC, \alpha, \frac{e}{D}, \frac{A_z}{D}\right) \quad (3.53)$$

El número de Reynolds indica en que régimen se encuentra el flujo, laminar o turbulento y esta dado por:

$$R_e = \frac{UL}{\nu} \quad (3.54)$$

donde U velocidad, en m/s, L , longitud característica, en tuberías es el diámetro D , en m, y ν viscosidad cinemática, $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

Diversos estudios, han demostrado que el valor de estos coeficientes está estrechamente relacionado con el número de Keulegan-Carpenter, el cual da información acerca de cómo es la separación del flujo alrededor de un cilindro dicho número se calcula a través de la siguiente expresión

$$KC = \frac{U_m T}{D} \tag{3.55}$$

donde U_m , es la velocidad máxima, T es el periodo de oscilación en s, y D es el diámetro de la tubería

Si el flujo es sinusoidal, el número de Keulegan-Carpenter se puede expresar

$$KC = \frac{2\pi a}{D} \tag{3.56}$$

En función del parámetro de vacíos, e/D , donde e es la porosidad y D el diámetro de la tubería en m, el número de Keulegan-Carpenter, el cual es adimensional, se presenta en la Tabla 3.5, Aguilar (1999)

		KC									
e/D		6	8	10	15	20	30	40	60	80	100
0	C_D	0.90	1.00	1.23	1.60	1.25	1.40	1.30	1.20	1.10	1.10
	C_M	3.29	3.29	3.29	3.29	3.38	3.80	4.10	4.20	4.80	4.85
	C_L	4.49	4.20	4.00	3.00	3.27	2.00	1.90	1.50	1.40	1.40
0.05	C_D	-	-	-	-	1.30	1.00	1.00	0.90	-	-
	C_M	2.60	2.60	2.60	2.65	2.65	2.70	2.80	3.20	-	-
	C_L	-	-	2.90	2.50	2.30	2.00	1.80	1.20	-	-
0.1	C_D	-	-	1.20	1.00	0.90	0.80	0.80	0.80	-	-
	C_M	2.40	2.40	2.40	2.38	2.38	1.35	1.35	1.35	-	-
	C_L	-	-	2.20	2.00	1.90	1.60	1.20	1.00	-	-
>1	C_D	1.80	1.80	1.75	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	-	-
	C_M	2.10	2.00	2.00	1.90	1.90	1.80	1.75	1.70	-	-
	C_L	-	-	1.70	1.00	1.00	0.70	0.40	0.20	-	-

Tabla 3.5. Coeficientes C_M , C_D y C_L en función de KC y e/D , Aguilar (1999)

La relación de corrientes se puede aplicar para clasificar los regímenes de flujo

$$\alpha = \frac{U_c}{U_c + U_w} \tag{3.57}$$

donde U_c es la velocidad de las corrientes, U_w es la velocidad normal a la tubería calculada en la altura de ola significativa para cada estado de mar, H_s , y T es el periodo pico, al cual se obtiene a partir del espectro de energía y es el inverso de la frecuencia con la mayor cantidad de energía asociada.

Si $\alpha = 0$, solo hay olaje, y es igual a 1 si solo hay corriente.



El coeficiente de inercia se puede calcular con ayuda de las expresiones

$$C_M = 1 + C_a \tag{3.58}$$

$$C_a = 1 + \frac{1}{\left(10 \cdot \left(\frac{e}{D}\right) + 1\right)} \tag{3.59}$$

donde C_a es el coeficiente de masa añadida y e/D se conoce como relación de enterramiento

El periodo de oscilación de una tubería aumenta cuando se incrementa la masa añadida.

La rugosidad relativa, k/D , tiene una gran influencia en la separación del flujo, y por lo tanto en los coeficientes de dragado y masa añadida.

El coeficiente de sustentación varía en función del enterramiento de la tubería tal como se indica en la Figura 3.12 (Bai Y., 2001).

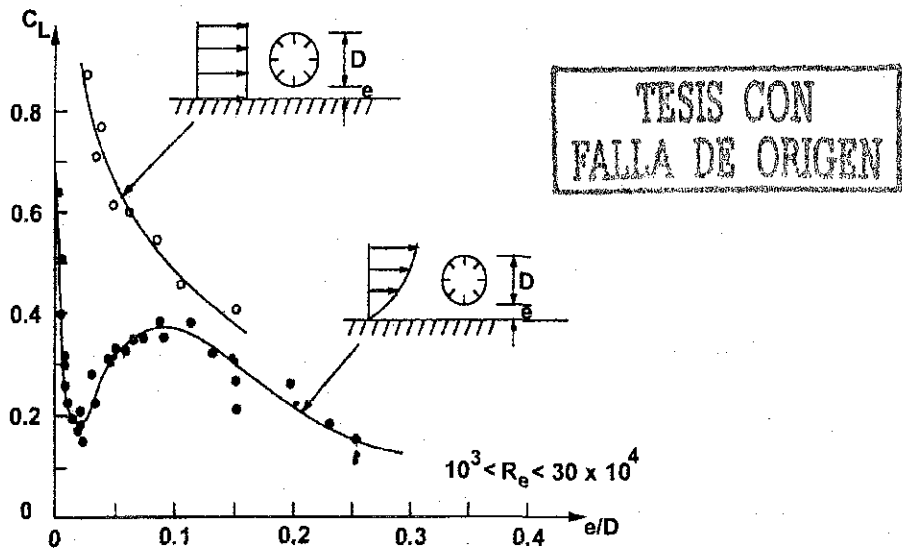


Figura 3.12. Valores del Coeficiente de Sustentación

En general, los valores de los coeficientes de arrastre, sustentación e inercia, oscilan entre los valores presentados en la Tabla 3.6.

Coeficiente	Valor mínimo	Valor Máximo
Arrastre	1.20	2.00
Sustentación	1.25	1.50
Inercia	1.65	3.29

Tabla 3.6. Valores máximos y mínimos de los Coeficientes C_M , C_D y C_L

3.5 Alineamiento óptimo para la minimización de fuerzas en Emisores submarinos

Como ya se ha indicado, las fuerzas debidas al oleaje son función de la altura de la ola, periodo de ésta y el ángulo que existe entre la dirección del oleaje y el eje del emisor. Por lo tanto las fuerzas resultantes están directamente relacionadas con el alineamiento de la tubería, por lo que debe existir un alineamiento donde se minimicen las fuerzas actuantes y por lo tanto el costo de construcción del emisor

Akyarlı y Arısoy (1992) proponen el siguiente método para determinar las fuerzas actuantes sobre la tubería y así obtener el alineamiento óptimo de un emisor.

3.5.1 Metodología

El primer paso es seleccionar un alineamiento inicial para la tubería y calcular las fuerzas hidrodinámicas creadas por una ola de diseño en diferentes puntos a lo largo de la parte no enterrada de la tubería, la cual normalmente comienza después de la zona de rompiente. Estas fuerzas se calculan con las ecuaciones (3.47) a (3.49). Los efectos de someramiento y difracción deben ser tomados en cuenta para cada punto donde se calculan las fuerzas, esto para considerar su influencia en la altura de ola y la dirección de ésta.

El segundo paso es determinar las fuerzas totales que afectan a la tubería tanto en la dirección horizontal como vertical (fuerzas horizontales y fuerzas de sustentación respectivamente), así como la fuerza total resultante, se utilizan las ecuaciones (3.60), (3.61) y (3.62)

Fuerza Total Horizontal

$$\sum F_h = F_1 \frac{L_1}{2} + \sum_{i=1}^{n-2} F_{i+1} \frac{(L_i + L_{i+1})}{2} + F_n \frac{L_{n-1}}{2} \quad (3.60)$$

Fuerza Total Vertical

$$\sum F_v = F_{L(1)} \frac{L_1}{2} + \sum_{i=1}^{n-2} F_{L(i+1)} \frac{(L_i + L_{i+1})}{2} + F_{L(n)} \frac{L_{n-1}}{2} \quad (3.61)$$

Fuerza Total

$$\sum R = \left[(\sum F_h)^2 + (\sum F_v)^2 \right]^{1/2} \quad (3.62)$$

Donde $F_y F_L$ son las fuerzas horizontales y de sustentación calculadas para los puntos seleccionados a las profundidades d_i ($i= 1, 2, \dots, n$) y L_i son las longitudes parciales de las tuberías entre dos puntos consecutivos a las profundidades d_i ($i= 1, 2, \dots, n$), ver Figura 3.13 y Figura 3.14.

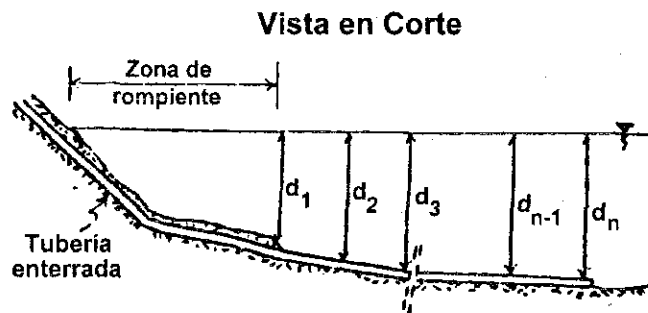


Figura 3.13. Definición de variables alineamiento óptimo (perfil)

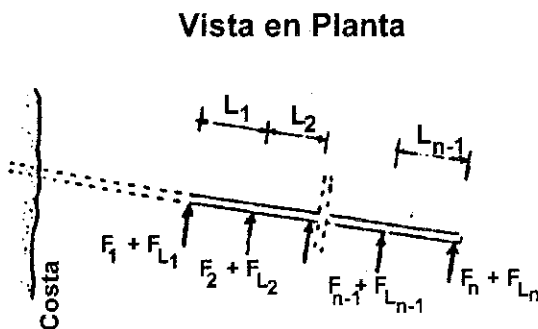


Figura 3.14. Definición de variables alineamiento óptimo (planta)

El tercer paso es repetir este mismo procedimiento para otro oleaje de diseño propagándose en diferentes direcciones, después de estos cálculos, los valores máximos de $\sum Fh, \sum Fv, \sum R$ y sus correspondientes características del oleaje pueden encontrarse para un alineamiento del emisor predeterminado.

El cuarto paso es obtener las variaciones de las fuerzas totales horizontal y vertical, lo mismo que la resultante para diferentes alineamientos de la tubería (β)

Finalmente, el alineamiento óptimo (β_{OPT}) es el alineamiento para el cual la fuerza resultante máxima $\sum R_{max}$ es mínima.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 4 MODELOS

4 MODELOS

En ingeniería, los modelos se utilizan para comprender y analizar el comportamiento de un fenómeno de una manera eficiente y a bajo costo, por ejemplo, no se puede esperar a que ocurra una avenida con un periodo de retorno de 10.000 años para diseñar una presa, es necesario utilizar un modelo para analizar el tránsito de la avenida por el embalse y así definir el nivel máximo que el agua alcanzará y por lo tanto determinar la altura mínima de la cortina.

En la hidráulica marítima y más específicamente en el diseño de emisores submarinos, por medio de los modelos, ya sean estos numéricos o empíricos, se puede comprender el comportamiento y las características de una pluma de agua residual en el océano para diversas condiciones geométricas, de oleaje y corrientes, y de esta manera diseñar el sistema de saneamiento de una manera óptima.

4.1 TIPOS DE MODELOS

Los principales tipos de modelos existentes para el estudio del comportamiento de los fluidos son: lagrangianos, eulerianos y modelos empíricos, estos modelos han sido desarrollados durante varias décadas por diferentes investigadores y los resultados han sido comprobados con datos experimentales o mediciones de campo

Dentro de los modelos lagrangianos se encuentran el modelo UM3 (Updated Merge tridimensional por sus siglas en inglés) el cual es la versión actualizada y en tres dimensiones del modelo UMERGE, entre los modelos eulerianos se encuentra el modelo UDKHG, el cual es a su vez la versión que permite la salida grafica de los resultados del modelo UKDHDEH y el modelo PDS (desarrollado por los investigadores Prych, Davis y Shirazi), entre los modelos empíricos se encuentra el modelo RSB desarrollado por los investigadores Roberts, Snyder y Baumgartner

El programa CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) desarrollado inicialmente por la universidad de Cornell también puede utilizarse para la modelación de descargas de aguas residuales en el océano, este programa tiene varios subprogramas dentro del cual se encuentra el programa CORJET, el cual trabaja con un modelo integral

4.2 MODELOS LAGRANGIANOS

En un modelo lagrangiano a cada partícula o rebanada que compone la pluma, se le sigue durante toda su trayectoria, y se identifican en cada instante sus propiedades fundamentales.

4.2.1 Modelo UM3

4.2.1.1 Teoría

La primera versión de este modelo, fue desarrollada en 1976 por W.E. Frick *et al*, y inicialmente estuvo enfocado a aplicaciones de descargas en agua dulce y en la atmósfera, el modelo UM3 es una versión actualizada del modelo UMERGE, el cual esta descrito por Muellenhoff *et al*. (1985).

Las principales características de este modelo son la formulación lagrangiana y las hipótesis de arrastre para el área proyectada (PAE), el análisis lagrangiano es simple y esto es útil en el desarrollo de la PAE.

Para entender el modelo es necesario conocer primero el elemento a partir del cual se construye el modelo, es decir, la pluma, esta es la base para comprender los principios de conservación, arrastre y combinación o fusión.

4.2.1.2 La pluma

La pluma que corresponde a la forma que adquiere una descarga de agua residual en el océano se divide en elementos infinitesimales de tipo lámina o rebanadas que tienen un ancho h muy pequeño comparándolo con las otras dos dimensiones. La forma final que tienen estos elementos es básica para la modelación, ya que el área proyectada, los arrastres forzado y de Taylor son directamente proporcional a la forma. Los arrastres forzado y de Taylor determinan el crecimiento del elemento y juegan un papel muy importante en la dinámica de la pluma.

En los modelos anteriores la forma del elemento se establecía arbitrariamente antes de determinar el comportamiento de la pluma, el modelador decidía la forma de la pluma, la interpretación más normal era asumir una pluma de sección circular para establecer la distribución de masa a lo largo de la trayectoria y los elementos se consideraban por lo tanto cilindros.

El problema de esta forma es que al tomarse como correcta los elementos que conforman la pluma están definidos por una superficie suave en el exterior y por planos o caras interiores que son perpendiculares a la trayectoria de la curva y si la trayectoria es curva esta definición conlleva a un elemento que no es cilíndrico sino que tiene la forma de un cono inclinado. Debido a que la longitud del elemento a lo largo de la trayectoria debe ser lo más pequeña posible, esto por razones matemáticas, es mejor concebir un elemento que sea una cuña delgada y curvada con aristas redondeadas o afiladas, este es el elemento que asume el modelo UM, como se indica en la Figura 4.1.

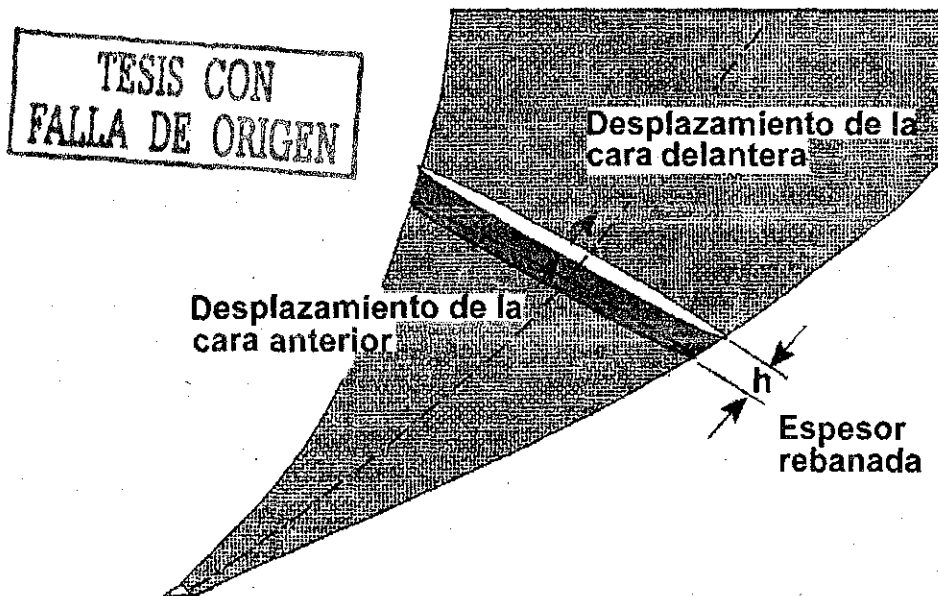


Figura 4.1. Esquema para el análisis con el modelo lagrangiano UM

La pluma se asume como fija, en una formulación lagrangiana esto implica que, la envolvente de la pluma permanecen invariable mientras los elementos se mueven cambiando su posición y forma con respecto al tiempo, sin embargo las condiciones pueden cambiar pero aun así la escala con la que estas cambian es mucho mayor que el tiempo que le toma a un elemento viajar desde el inicio de la pluma hasta el final de esta. Se asume finalmente un estado invariable de la pluma para poder derivar la longitud de los elementos que componen la pluma en función de la velocidad media instantánea, su longitud inicial y la velocidad inicial del efluente. Las propiedades de la rebanada se asumen uniformes (figura 1 del Capítulo Difusores), pero varían a lo largo de la trayectoria con el tiempo. El tamaño y la forma de la rebanada varían como resultado de la curvatura, el arrastre y el crecimiento de la pluma.

La frontera exterior de la pluma coincide con el borde del orificio por el cual esta emana, el volumen de la pluma se calcula a partir de la masa que es arrastrada hacia esta y de la forma del elemento que se asume, se debe tener en cuenta que las propiedades de la pluma en la frontera son indistinguibles de las propiedades del agua de mar adyacente, esto tiene importantes implicaciones, entre las cuales están que la fuerza de arrastre no es una fuerza importante en la dinámica del pluma y además que la masa cruza el área proyectada del elemento a la velocidad de la corriente local.

4.2.1.3 Principios de Conservación

El modelo UM incluye principios de masa (continuidad), cantidad de movimiento y energía. El principio de conservación representa una masa inicial del elemento y la que se adiciona, debido al arrastre, se conservan en el tiempo, en términos de modelación la masa del elemento se incrementa por la cantidad de fluido que pasa a través de la frontera exterior del elemento en un tiempo determinado.

La cantidad de movimiento horizontal, el cual es el producto de la masa y la velocidad horizontal, se conserva, este cambia por la cantidad de movimiento horizontal debida al arrastre del fluido en el mismo tiempo. La cantidad de movimiento vertical generalmente no se conserva por que esta se transforma en la flotación, una fuerza de cuerpo que aparece debido a la diferencia de densidades entre el efluente y el agua de mar.

La energía también se conserva, similarmente esta se incrementa en una cantidad de energía igual al producto de una calor específico constante, a masa que es arrastrada y la temperatura ambiental.

El arrastre es el proceso por el cual la pluma incorpora material proveniente del ambiente dentro de ella misma, esto puede ser entendido como un proceso en el cual el fluido fluye al interior de la pluma a través de la superficie exterior, también puede ser concebido como un proceso de acreción seguido por una distribución de material.

Varios mecanismos de arrastre son considerados: aspiración, forzado y difusión. El arrastre debido a la aspiración es también conocido como arrastre de cortante o de Taylor y está presente aun en la ausencia de corrientes, es debido a que las regiones de alta velocidad son regiones de baja presión lo cual causa que el material fluya dentro de la pluma, por esto la pluma influye sobre un campo de flujo en el agua que la rodea.

El arrastre forzado se debe a la presencia de corrientes locales que adicionan masa dentro de la pluma. La difusión siempre está presente, pero solo adquiere real importancia mas allá de la región de mezclado inicial, esta empieza a ser importante después de que los dos mecanismos anteriores pierden capacidad debido a la reducción del cortante entre la pluma y el ambiente, la difusión se considera por lo tanto en el campo lejano

El arrastre forzado a través de área proyectada de la pluma se compone de 3 términos, el primero de estos es proporcional a la longitud y al radio del elemento (componente cilíndrica), el segundo es proporcional al crecimiento del diámetro de la pluma y el tercero a la curvatura de la trayectoria que cierra o abre el área en la superficie del elemento. El arrastre de Taylor se considera como un cuarto término, el cual abarca el total del área perimetral.

Cuando plumas adyacentes crecen lo suficiente, empiezan a unirse entre si. La combinación de plumas reduce el arrastre ya que disminuye el área entre el pluma y el ambiente, cada uno de cuatro arrastres mencionados decrece con una tasa diferente. En esencia, para considerar esta unión se necesitan simples correcciones geométricas.

Las variaciones en el ángulo entre el difusor y la corriente son consideradas matemáticamente reduciendo el espacio entre puertos adyacentes por el apropiado factor trigonométrico.

Generalmente los difusores tiene puertos a ambos lados de este, en presencia de las corrientes, las plumas de aguas arriba serán dobladas y por lo tanto se unen con las plumas de aguas abajo, para estimar la disminución en la dilución debido a este proceso, el modelo UM tiene tres formas, la primera es reducir el espaciamiento entre puertos por un factor de dos, este método se justifica por la experiencia pero no se sabe que tan precisos son los resultados obtenidos, el segundo método consiste en estimar la concentración debida a la pluma de aguas arriba, mientras que el tercer método duplica el flujo por puerto e incrementa el diámetro de este para mantener el mismo número de Froude densimétrico. Ninguno de estos métodos considera los cambios en el perfil de densidad que realiza la descarga de aguas arriba.

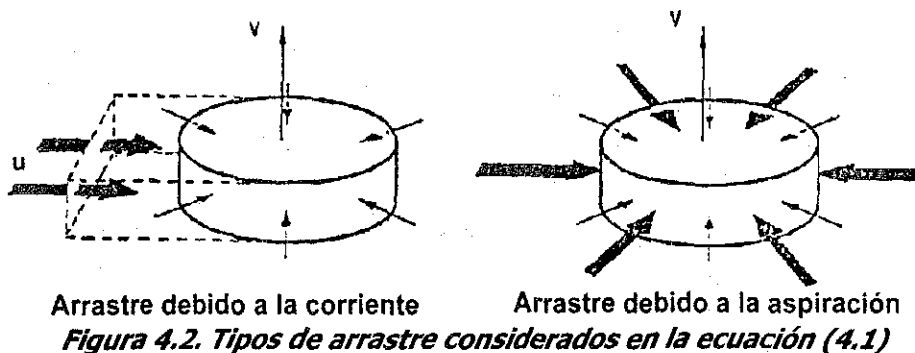
4.2.1.4 Ecuaciones para el Modelo UM

Las ecuaciones de conservación utilizadas en este modelo son las siguientes

4.2.1.4.1 Conservación de la masa

$$\frac{dm}{dt} = E_{amb} + E_a \tag{4.1}$$

donde E_{amb} es el arrastre debido a las corrientes, E_a es el arrastre debido a la aspiración tipo Taylor y m es la masa, en la Figura 4.2 se esquematizan los 2 tipos de arrastre que se presentan en la ecuación (4.1)



El arrastre debido a las corrientes se calcula con:

$$E_{amb} = \rho A_p \bar{U} \quad (4.2)$$

Donde ρ es la densidad del agua, A_p es el área proyectada de la sección y \bar{U} es el vector de velocidades del agua de mar cerca del elemento.

El segundo término se calcula con:

$$E_\alpha = \alpha \rho A_T \left| \bar{V} \right| \quad (4.3)$$

Donde A_T es el área de la sección en contacto con el ambiente (generalmente $2\pi b h$, donde b es el radio medio y h es el espesor de la sección), V es la velocidad media a través de la sección y α es la función de arrastre, la cual para un perfil de velocidades rectangular (tipo sombrero de copa) puede tomarse como 0.1 según Muellenhoff *et al* (1985). Estos términos pueden evaluarse a partir de las condiciones iniciales para la sección, la suma de estos términos dan la razón de cambios de la masa en el elemento, una vez que son determinados se pueden calcular el cambio en la cantidad de movimiento, la energía y la concentración de sustancias con las ecuaciones (4.4), (4.5) y (4.7) respectivamente.

4.2.1.4.2 Conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{dm\bar{U}}{dt} = \bar{U}_\infty \frac{dm}{dt} - mg \frac{(\rho_\infty - \rho)}{\rho} \quad (4.4)$$

El primer término de la ecuación (4.4) representa el cambio total en la cantidad de movimiento en la sección, el cual es un vector, el segundo término es el cambio en la cantidad de movimiento producida por el arrastre del agua que rodea la rebanada, el tercer término es el cambio vertical en la pluma producido por la flotación de este debido a la diferencia entre las densidades del efluente y el agua de mar.

Es importante aclarar que el elemento con el cual se modela la pluma es infinitesimal solamente con respecto a la línea central, y que en las direcciones perpendiculares a esta puede ser muy extenso, por lo que la velocidad ambiental U puede variar significativamente. En el modelo UM se aproxima la velocidad ambiental al nivel de la partícula.

En la ecuación (4.4) se puede observar que el cambio en la cantidad de movimiento en el elemento se debe a la cantidad de movimiento que se introduce por medio de la masa arrastrada dm y al cambio en la cantidad de movimiento vertical generado por la fuerza de flotación. Esta suposición implícita permite obviar los efectos de arrastre, lo cual es consistente con la hipótesis de que el elemento tiene las mismas propiedades que el fluido en las fronteras y por consiguiente no hay cortantes que puedan generar arrastre

4.2.1.4.3 Conservación de la energía

$$\frac{d[mC_p(T - T_{ref})]}{dt} = C_p(T_a - T_{ref}) \frac{dm}{dt} \quad (4.5)$$

En la ecuación (4.5) asume que toda la energía es térmica y se desprecian las reacciones químicas que potencialmente pueden producir un cambio en la temperatura. En dicha ecuación C_p es el calor específico a una presión constante, T , T_a y T_{ref} son la temperatura media del elemento, la temperatura ambiental y una temperatura de referencia, respectivamente. Si se asume que C_p es constante en el rango de interés, la ecuación (4.5) se simplifica a

$$\frac{dmT}{dt} = T_a \frac{dm}{dt} \quad (4.6)$$

4.2.1.4.4 Conservación de sustancias

$$\frac{dmC_i}{dt} = C_\infty \frac{dm}{dt} - kmC_p \quad (4.7)$$

En esta ecuación el último término considera el decaimiento de la sustancia que se desea modelar, si se trata de un contaminante conservativo k es igual a cero.

En las ecuaciones anteriores, C_i es la especie en consideración, el subíndice ∞ se refiere a las condiciones ambientales, k es el coeficiente de decaimiento de primer orden, T es la temperatura, ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad y C_p es el calor específico.

El coeficiente de decaimiento k , se calcula, según Mancini (1978), con la expresión

$$k = (0.8 + 0.006(\% \text{ agua salada})) \times 1.07^{(t-20)} + \frac{I_A}{k_e H} (1 - e^{-k_e H}) \quad (4.8)$$

Donde H es la profundidad total de la columna de agua, I_A es la radiación solar media diaria en la superficie (langley/hr, es decir, cal/cm²/hr), k_e es el coeficiente de extinción solar (adquiere un valor típico de 0.16m⁻¹) y t es la temperatura (°C). En la expresión anterior, se ha asumido que la radiación, conducción y difusión muy pequeñas con respecto a los otros términos, por lo que la salinidad y la temperatura se consideran como propiedades conservativas

4.2.1.5 Procedimiento de cálculo

El procedimiento de cálculo que se sigue en el modelo UM es:

- Se define un incremento de tiempo
- Las ecuaciones de arrastre son utilizadas para determinar la cantidad de masa que se adiciona durante este intervalo de tiempo
- Este incremento se compara con el incremento de masa deseado, de ser necesario se realiza un ajuste en el intervalo de tiempo y se vuelven a utilizar las ecuaciones de arrastre.
- Las ecuaciones de movimiento y los otros tipos de ecuaciones se utilizan
- Se escoge un nuevo incremento de tiempo y se repite el proceso.

La masa de la sección se calcula con la ecuación (4.9)

$$m = \rho \pi b^2 h \quad (4.9)$$

El espesor de la sección puede variar con el tiempo, esto debido a que las velocidades en cada cara de esta son diferentes. La densidad se calcula con la temperatura y la salinidad de fluido que compone la sección.

La integración de las ecuaciones anteriores para el modelo UM se realiza por medio de un método de integración secuencial con pasos hacia adelante, donde:

$$m_{t+dt} = m_t + (E_{amb} + E_\alpha) dt \quad (4.10)$$

El cálculo de la nueva energía, cantidad de movimiento y concentración se realiza de manera similar, esto genera los nuevos valores. La nueva masa y la nueva cantidad de movimiento son por lo tanto:

$$m_{t+dt} = (\rho \pi b^2 h)_{t+dt} \quad (4.11)$$

$$\left(m \left| \bar{V} \right| \right)_{t+dt} = \left(\rho \pi b^2 h \left| \bar{V} \right| \right)_{t+dt} \quad (4.12)$$

La integración en un paso, dt , puede tomarse como $dt = h/V$, lo cual conlleva a:

$$\Delta h = \Delta \left| \bar{V} \right| dt \quad (4.13)$$

El nuevo espesor se calcula entonces con:

$$h_{t+dt} = h_t \left(\frac{V_{t+dt}}{V_t} \right) \quad (4.14)$$

Las ecuaciones (4.11), (4.12) y (4.14) son 3 ecuaciones con tres incógnitas, V , B y h en el nuevo tiempo, con las ecuaciones (4.5) y (4.7) se calcula la nueva temperatura y la concentración, la distancia y la dirección del movimiento son encontrados a través del vector de velocidad y el intervalo de tiempo, dt .

4.3 Modelos Eulerianos

Los modelos eulerianos tienen un volumen de control fijo y calculan los cambios en las propiedades de los fluidos que entran y salen a través de este, las ecuaciones están expresadas en derivadas espaciales, a diferencia de los modelos lagrangianos en los cuales las derivadas están con respecto al tiempo. El modelo UDKHG usa una aproximación euleriana y métodos integrales para convertir las

ecuaciones de gobierno, las cuales tiene derivadas parciales, en una serie ordinaria de ecuaciones diferenciales.

Se ha encontrado que este método produce muy buenas aproximaciones para determinar el comportamiento de fluidos siempre y cuando los efectos de frontera no intervengan en el problema. Los métodos integrales requieren que se asuman perfiles de distribución para las velocidades, temperatura y concentraciones.

4.3.1 Modelo UDKHG

4.3.1.1 Desarrollo teórico

El esquema básico de cómputo para el UDKHG está basado en el análisis de Hirst (1971), cual desarrolló un análisis en 3 dimensiones para la descarga de múltiples puertos sumergidos en un ambiente estratificado, y con corrientes en cualquier dirección con respecto al eje del difusor. También él desarrolló las ecuaciones de movimiento y energía a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes y las ecuaciones de transporte de energía.

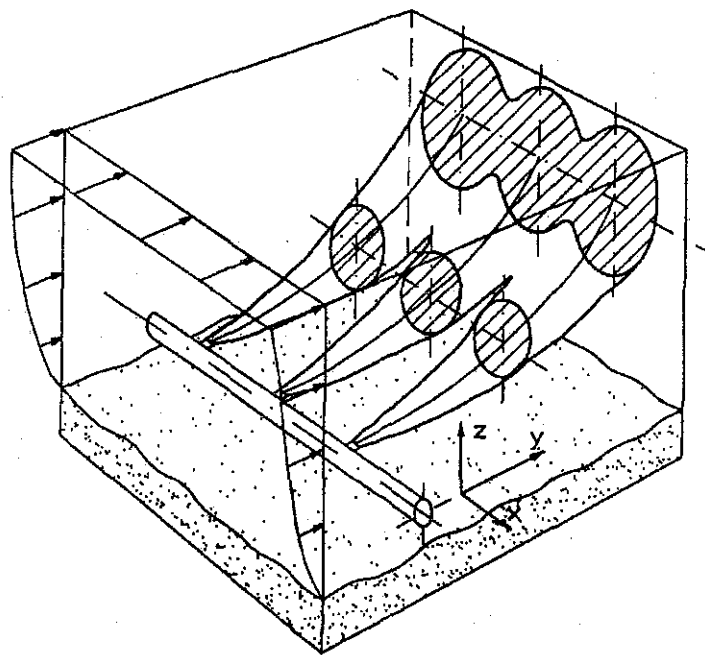


Figura 4.3. Definición de coordenadas para una pluma tridimensional

La Figura 4.3 muestra el esquema seguido por una pluma en 3 dimensiones y las coordenadas usadas, para asumir simetría y poder integrar en la dirección radial, estas ecuaciones fueron expresadas de la siguiente manera

4.3.1.1.1 Conservación de la masa

$$\frac{d}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} r dr = E \tag{4.15}$$



La ecuación (4.15) indica que el cambio en la tasa de flujo en el interior de la pluma es igual a la entrada de fluido, E . Esta entrada de fluido es debido al arrastre forzado, arrastre de aspiración y el arrastre de tipo térmico-flotante, que se calculan con la ecuación (1.35) del Anexo 1.

4.3.1.1.2 Conservación de la energía

$$\frac{d}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} \left(\bar{T} - \bar{T}_a \right) r dr = \frac{d\bar{T}_a}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} r dr - \lim_{r \rightarrow \infty} \left(r \bar{v} \bar{T} \right) \quad (4.16)$$

El primer término de la ecuación (4.16) representa el exceso total de energía térmica en la pluma, el segundo término representa el cambio en el exceso de energía térmica debido a la temperatura estratificada (el ambiente de referencia está cambiando), el último término con el parámetro de turbulencia v es el intercambio de la energía térmica debido a la turbulencia en el ambiente en los bordes de la pluma. La capacidad calórica se asume constante y se cancela en todos los términos.

4.3.1.1.3 Conservación de sustancias

Esta ecuación es la misma que la ecuación para conservación de la energía, y sólo se reemplaza la concentración por la temperatura.

$$\frac{d}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} \left(\bar{C} - \bar{C}_a \right) r dr = \frac{d\bar{C}_a}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} r dr - \lim_{r \rightarrow \infty} \left(r \bar{v} \bar{C} \right) \quad (4.17)$$

4.3.1.1.4 Conservación de la cantidad de movimiento sobre la trayectoria

$$\frac{d}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u}^2 r dr = \bar{u}_a E \sin \theta_1 + \int_0^{\infty} g (\rho - \rho_0) r dr \sin \theta_2 - \lim_{r \rightarrow \infty} \left(r \bar{u} \bar{v} \right) \quad (4.18)$$

El primer término de la ecuación (4.18) es el cambio en la cantidad de movimiento en la dirección del eje de la pluma, el segundo es el cambio en la cantidad del movimiento debido al arrastre ambiental, el tercer término es el cambio debido a la diferencia de densidades entre el efluente y el agua del océano y el último término representa los cambios a los que contribuye la turbulencia ambiental.

4.3.2 Modelo PDSG

El modelo PDSG deriva su nombre de los iniciales de los investigadores Prych, Davis y Shirazi. Este modelo se utiliza para caracterizar las descargas superficiales dado que estas se comportan de manera diferente a las descargas sumergidas debido al efecto de la superficie libre, lo cual ocurre cuando la descarga de un efluente que puede flotar se realiza cerca de la superficie libre o por medio de un canal se descarga en un río, lago o directamente en la costa. Si la descarga es menos densa que el agua que la recibe, se obliga a que la descarga se dirija hacia arriba.

En el caso anterior, la superficie actúa como una tapa, por lo cual al dirigirse la pluma hacia arriba esta será cada vez más delgada y se producirá una dispersión lateral en todas las direcciones, lo cual disminuye el arrastre vertical. La pluma resultante es delgada, ancha y con muy poco arrastre, excepto en la descarga. Además si la descarga es caliente, la transferencia de calor en la superficie reduce la

temperatura y la energía térmica no es conservada como en una descarga sumergida. Todo esto debe tenerse en cuenta en los modelos de superficie.

Como ya se mencionó anteriormente este modelo se utiliza para descargas superficiales, las cuales se encuentran fuera del alcance de este trabajo, el desarrollo matemático de este modelo se esquematiza en el Anexo 1

4.4 Modelos empíricos y de longitud de escala

En los modelos de longitud de escala utilizados para modelar una descarga producida por un emisor submarino, un concepto básico es que las variables que participan directamente en los procesos de mezclado pueden ser agrupadas en conjuntos de variables que tienen por unidad la longitud, mientras mas grande sea el valor que adquieren estas longitudes de escala mas importante son las variables que hacen parte de ella para la modelación del comportamiento de la pluma.

Una serie de relaciones entre las variables obtenidas anteriormente se utilizan para formar parámetros adimensionales, que a su vez se utiliza para crear expresiones que sirven para estimar el comportamiento de una descarga. Estas expresiones han sido validadas por los datos obtenidos en laboratorio

Este método generalmente funciona siempre y cuando los datos con los que se diseña estén dentro del mismo rango de los datos obtenidos en laboratorio, los cuales fueron utilizados para desarrollar las expresiones. Sin embargo se deben tener precauciones, la primera es no utilizar las ecuaciones para predecir el comportamiento en el campo fuera de los límites originales de los datos de laboratorio, es decir, no usar extrapolación, segundo, las ecuaciones pueden que no sean continuas, como se muestra en la Figura 4.4, por lo que determinar un valor puede ser diferente dependiendo del lado de la frontera que se utilice, se debe tener siempre en mente el cómo las expresiones fueron obtenidas para no cometer errores.

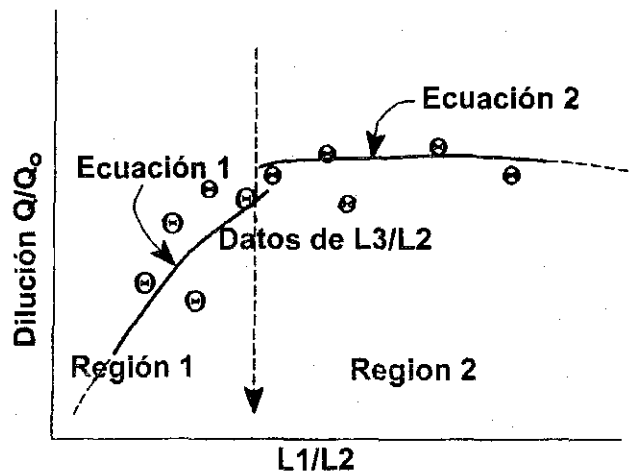


Figura 4.4. Gráfica en la cual se indican como los parámetros adimensionales son utilizados para determinar las ecuaciones empíricas

Finalmente, en ocasiones es imposible tener las mismas condiciones, sobre todo de turbulencia y efectos de frontera, por lo que el fenómeno que se modela en el laboratorio puede ser diferente al que ocurre en la realidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La gran ventaja de estos métodos es la facilidad para evaluarse las ecuaciones, también que a menudo incluyen efectos físicos, como interacciones de frontera, que no se incluyen fácilmente en modelos matemáticos como el UDKHG y el UM.

4.4.1 Modelo RSB

El modelo RSB es un modelo empírico de longitud de escala diseñado para emisores submarinos. Este modelo se basa en los estudios experimentales realizados por Roberts, Snyder y Baumgartner (1989). En el funcionamiento de un emisor submarino es común que la estratificación natural de la densidad del agua de mar produzca un campo de flujo sumergido, el cual no alcanza la superficie libre del mar.

En el diseño de un emisor submarino y, específicamente, para cuantificar el impacto ambiental producido por su descarga, es necesario predecir las características del campo de flujo, particularmente la profundidad de sumergencia, o de estabilización, su anchura y la dilución que se produce. La predicción de estas características es una tarea difícil, debido a la gran cantidad de variables que hacen parte del proceso, entre las que se encuentran variables ambientales y de diseño, dentro de las primeras están la estratificación y las corrientes en el mar, al segundo grupo pertenecen el espaciamiento entre puertos y la velocidad de salida del flujo.

4.4.1.1 Esquema del problema

El esquema del problema se presenta en la Figura 4.5 y Figura 4.6, en esta el efluente tiene una densidad ρ_a una velocidad de salida u_j , los puertos tienen forma de T y se encuentran espaciados una distancia s , con un diámetro constante d . La densidad del agua de mar, ρ , decrece linealmente con la profundidad, z , hasta alcanzar un valor de ρ_a , en el nivel del puerto una corriente uniforme fluye con una velocidad constante u_i y tiene un ángulo θ con respecto al eje del difusor. El origen del sistema de coordenadas está localizado en el centro del difusor con la dirección en X siguiendo la corriente u_i , la dirección Y , en sentido transversal y el eje Z dirigido hacia la superficie libre.

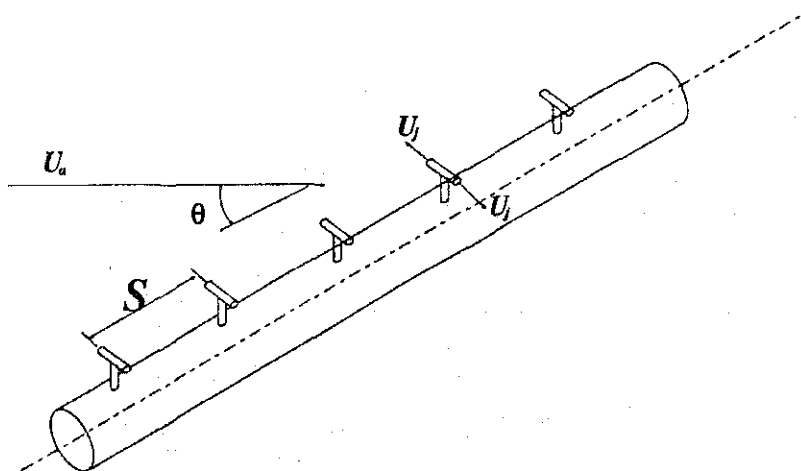


Figura 4.5. Definición de variables propuesta por Roberts et al (1989)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

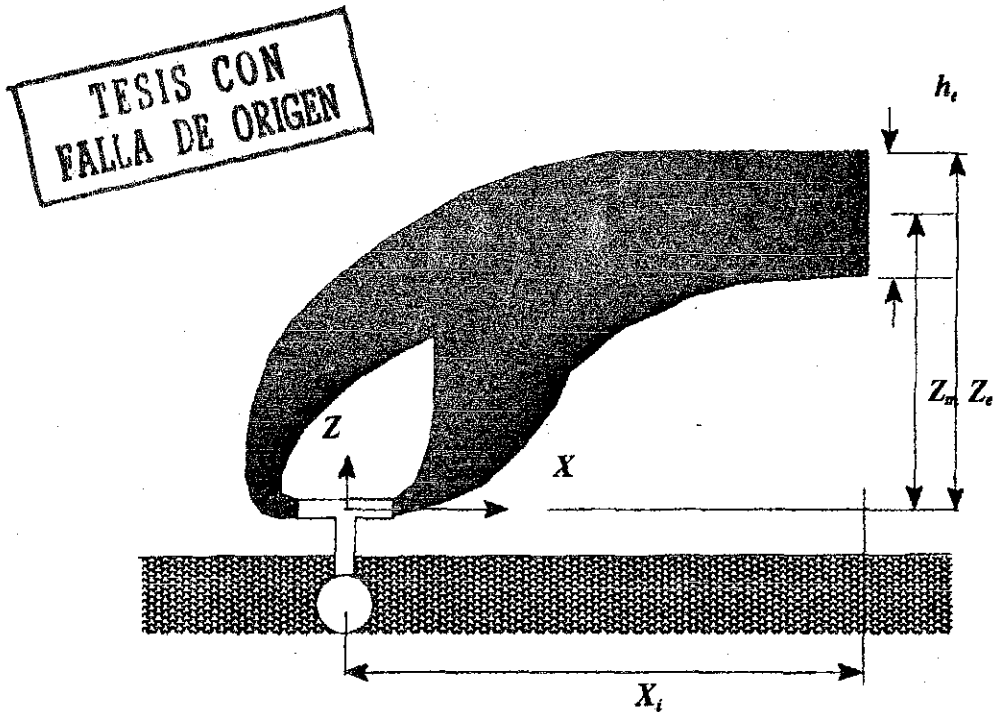


Figura 4.6. Definición de variables propuesta por Roberts et al (1989)

La descarga del emisor puede caracterizarse por un flujo por unidad de longitud, q , la cantidad de movimiento, m y flotabilidad, b , como se indica con las expresiones (4.19), (4.20) y (4.21), respectivamente:

$$q = \frac{Q}{L} \tag{4.19}$$

$$m = u_j q \tag{4.20}$$

$$b = g' q \tag{4.21}$$

- donde Q , caudal total, en m^3/s
- L , longitud total de los difusores, en m
- q , caudal por unidad de longitud, en m^2/s
- u_j , velocidad del flujo en los puertos, en m/s
- m , cantidad de movimiento, en m^3/s^2
- g' , aceleración de la gravedad modificada, en m^2/s
- b , flotabilidad por unidad de longitud, en m^3/s^3

La aceleración de la gravedad modificada se calcula con (4.22):

$$g' = g \left(\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} \right) \tag{4.22}$$

donde g es la aceleración de la gravedad igual a $9.81 \text{ m}^2/s$



Respetando la notación utilizada en la literatura especializada, los flujos en ambiente con densidad estratificada se caracterizan a través de la frecuencia de flotación N ó gradiente de densidad ambiental (4.23)

$$N = \left(-\frac{g}{\rho_a} \frac{d\rho}{dz} \right)^{1/2} \quad (4.23)$$

4.4.1.2 Análisis dimensional

Por medio del análisis dimensional, cualquier propiedad del flujo, Φ , puede expresarse como:

$$\Phi = f(q, b, m, s, u, N, \theta) \quad (4.24)$$

Para esto se asume que el flujo es totalmente turbulento e independiente de la viscosidad y el número de Reynolds, según Wright *et al* (25) se definen tres parámetros de escala de longitud:

$$l_q = \frac{q^2}{m} \quad (4.25)$$

$$l_b = \frac{b^{1/3}}{N} \quad (4.26)$$

$$l_m = \frac{m}{b^{2/3}} \quad (4.27)$$

Continuando con el análisis dimensional y con la ayuda de los parámetros de escala y aplicando criterios del análisis dimensional (Teorema de Buckingham-Vaschyse puede simplificar la expresión (4.24), la cual se convierte en (4.28)

$$\Phi = f\left(\frac{l_q}{l_b}, \frac{l_m}{l_b}, \frac{s}{l_b}, \frac{u^3}{b}, \theta\right) \quad (4.28)$$

Debido a que el caudal por unidad de longitud, q , tiene un efecto dinámico muy pequeño en el comportamiento de la pluma, excepto para puertos con un espaciamento muy pequeño, Wright *et al* (25), para el rango típico de condiciones que se presentan en un emisor submarino, l_q/l_b es mucho mas pequeño que 1 y puede despreciarse.

La relación u^3/b es un tipo de número de Froude, denotado como F , el cual es usado por Roberts *et al* (1989) para describir los resultados de los experimentos con plumas lineales y comúnmente conocido como Número de Roberts, (Roberts *et al* 1989) la expresión (4.28), se reduce ahora a:

$$\Phi = f\left(\frac{l_m}{l_b}, \frac{s}{l_b}, F, \theta\right) \quad (4.29)$$

Donde los 2 primeros parámetros son característicos del difusor los cuales determinan la importancia de la cantidad de movimiento en el inicio de la descarga y el espaciamiento respectivamente

Las condiciones indicadas en las figuras 9, pueden expresarse en con ayuda de la expresión (4.29), las características geométricas son: el espesor, h_e , la altura hasta el punto de estabilización de la pluma, Z_e , la altura hasta el nivel de máxima concentración, es decir, el de mínima dilución, Z_m la ecuación (4.29) anterior se transforma en (4.30):

$$\frac{h_e}{l_b}, \frac{z_e}{l_b}, \frac{z_m}{l_b} = f\left(\frac{l_m}{l_b}, \frac{s}{l_b}, F, \theta\right) \tag{4.30}$$

La dilución que produce un emisor submarino se puede caracterizar por medio del parámetro Π , definido por Wright *et al*(25):

$$\Pi = \frac{S_m q N}{b^{2/3}} \tag{4.31}$$

donde: $S_m =$ La mínima dilución inicial, definida como el valor mas pequeño de la dilución, corresponde a la máxima concentración, observado en un plano vertical que pasa por el campo de flujo al final del campo cercano.

4.4.1.3 *Campo cercano y lejano*

La región del océano en la cual influye directamente una salida submarina, se divide en 2 subregiones para su caracterización, en cada una de estas regiones ocurren fenómenos distintos y sus propiedades se calculan de manera diferente ya que los procesos que influyen en la mezcla del efluente con el agua de mar son distintos en cada región, este esquema se indica en la Figura 4.7.

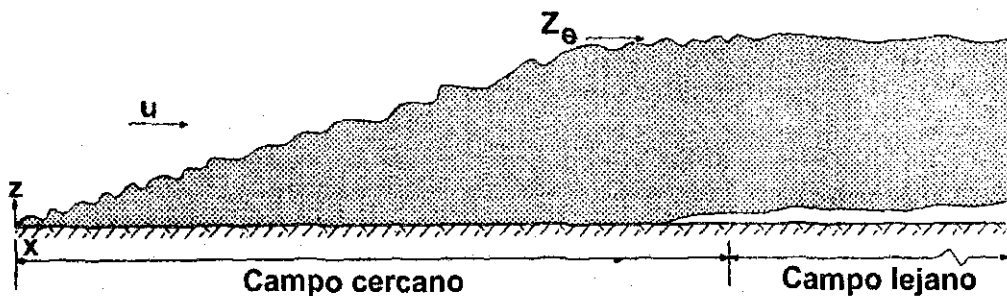


Figura 4.7. Zonas en las que se divide la pluma

Cerca al difusor, la mezcla se efectúa por la cantidad de movimiento del flujo y la flotación, de esta manera la interacción es muy fuerte lo cual causa que la dilución se incremente rápidamente hacia aguas abajo en la dirección X , esta región se conoce como "Campo cercano" o "Región inicial de mezcla" y la dilución que alcanza el efluente al final de esta se denomina Dilución inicial.

En el campo cercano la mezcla es producida por la turbulencia generada por la misma descarga, este campo se extiende por varias decenas o en algunos casos centenas de metros y la dilución que se produce es del orden de varios cientos de veces y está termina cuando la turbulencia colapsa

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

totalmente. En este punto se considera que el campo de flujo residual es estable y puede estar sumergido o no, dependiendo de la fuerte que sea la estratificación.

Lejos del emisor, el mezclado debido a las corrientes del ambiente domina el proceso, por lo cual la dilución sigue creciendo, pero con un ritmo mucho menor, generalmente es del orden de diez veces que la que se presenta en el campo cercano, esta segunda región se conoce como "Campo Lejano". Luego el campo de flujo sigue la dirección de las corrientes oceánicas y la dispersión ocurre por la turbulencia en el mar. El efecto del campo lejano se extiende por varios kilómetros y dura varias horas.

El efluente inicialmente se comporta como un chorro que puede flotar, el cual puede alcanzar la superficie libre o quedar atrapado en un nivel de flotación neutro, lo cual obliga a que el flujo se vuelva horizontal. En el caso de un efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales, el tiempo en el que ocurre el proceso de mezcla en el campo cercano es del orden de minutos y la longitud de este campo es del orden de la longitud del difusor

En el campo lejano, la dispersión del efluente se asocia con dos componentes: una advectiva y otra difusiva. La advección es el proceso de transporte de masa debido a la velocidad media de las corrientes que actúan en el campo lejano, mientras que la difusión es el proceso de propagación del efluente por el mezclado como producto de la difusión turbulenta y la dispersión del cortante asociado a el gradiente de velocidad.

4.4.1.4 Hipótesis básicas y formulación del problema

La dilución total de la descarga de un efluente a través de un emisor submarino puede definirse por medio de la expresión (4.32)

$$S = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (4.32)$$

donde S_1 es la dilución inicial, S_2 es la disolución debida a la dispersión y S_3 es la dilución efectiva debida al decaimiento de las bacterias coliformes.

La dilución por la dispersión se origina cuando el efluente se mueve por acción de las corrientes presentes en el momento de la descarga y es debida a la mezcla entre el efluente y el agua de mar. Es fácil que las corrientes marinas varíen en dirección y magnitud en el tiempo y el espacio, pero los modelos matemáticos de dispersión aplicados al campo lejano se basan en la hipótesis de que las corrientes permanecen constantes, en este caso, se trabaja con la condición mas desfavorable, la cual es la que se utiliza para el diseño ingenieril.

La dilución debida al decaimiento de las coliformes predice la reducción en la concentración de sustancias no conservativas o coliformes debido a transformaciones químicas; la mortalidad y la sedimentación. La Hipótesis básica que se realiza es que la razón de desaparición de una sustancia o microorganismo es proporcional a su concentración en el agua.

4.4.1.5 Análisis de la dilución en la zona cercana

Los procesos de disolución son afectados directamente por la orientación del difusor con respecto a la corriente, se describe el comportamiento para las direcciones de 90, 45 y 0 grados, según Economopoulou *et al*/2001.

4.4.1.5.1 Dilución inicial S_1 , ambiente linealmente estratificado

Las expresiones de Roberts *et al* (1989) se utilizan para obtener la dilución inicial en el campo cercano, para difusores con puertos perpendiculares al eje del difusor en ambas direcciones, con aspersores en forma de T y despreciando el espaciado entre puertos y el gradiente ambiental de densidad. Es importante recordar que los fenómenos que causan este tipo de dilución son la fuerte mezcla producida por la salida rápida y la cantidad de movimiento del agua del emisor, aproximadamente su longitud varía aproximadamente entre 10 y 1000 metros y el tiempo oscila entre 1 y 10 minutos.

Para 90°

$$S_1 = 2 \cdot \frac{b^{3/2}}{q \cdot N} \left(2.19 \cdot F^{1/6} - 0.52 \right) \quad (4.33)$$

Para 45°

$$S_1 = 2 \cdot \frac{b^{3/2}}{q \cdot N} \left(1.3214 \cdot F^{0.2014} \right) \quad (4.34)$$

Para 0°

$$S_1 = (0.1209 \cdot \ln F + 2.1876) 2 \cdot \frac{b^{3/2}}{q \cdot N} \left(1.15 \cdot F^{0.1345} \right) \quad (4.35)$$

El flotabilidad por unidad de longitud, b , y la aceleración de la gravedad modificada, g' ; la frecuencia de flotación, N se definen con las ecuaciones (4.21), (4.22) y (4.23) respectivamente, el número Froude de Roberts se define con (4.36)

$$F = \left(\frac{U^3}{b} \right) \quad (4.36)$$

4.4.1.5.2 Altura de la pluma

La altura que alcanza la pluma, z_e antes de estabilizarse puede ser calculada, según Roberts *et al* (1989), con las siguientes expresiones

Para $0.1 \leq F \leq 1$

$$z_e = 2.74 \cdot \frac{b^{1/3}}{N} \quad (4.37)$$

Para 90° y 45° , y $1 \leq F \leq 100$

$$z_e = 2.5 \cdot \frac{b^{1/3}}{N} \cdot F^{-1/6} \quad (4.38)$$

Para 0° , $y \leq F \leq 100$

$$z_e = 2.59 \cdot \frac{b^{1/3}}{N} \cdot F^{-0.0447} \quad (4.39)$$

Las ecuaciones anteriores son aplicables para efluentes totalmente sumergidos, es decir, $z < H$, y predicen el valor de S_f adecuadamente en el rango $0.1 \leq F \leq 100$. Si el efluente alcanza la superficie, se deben utilizar las expresiones para un ambiente no estratificado.

4.4.1.5.3 Longitud del campo cercano

La longitud de la zona de mezcla inicial, para corrientes perpendiculares, X_i , conocido también como campo cercano, puede calcularse, según Roberts *et al.* (1989b) como:

Para 90°

$$X_i = 8.5 \cdot \frac{U}{N} \quad (4.40)$$

En ausencia de relaciones apropiadas para 45° y 0° , se puede asumir que X_i es igual que para 90° , esto genera diseños conservadores, ya que los datos reportados muestran que siempre que para 90° X_i es mayor que para 0°

4.4.1.5.4 Anchura de la pluma

El ancho de la pluma, w_o , al final del campo cercano, para corrientes perpendiculares, esta dado, según Roberts *et al.* (1989b), por la ecuación (4.41), la cual también puede asumirse para corrientes a 45° .

Para 90° y 45°

$$\frac{w_o}{L} = 1 + 0.17 \cdot \left(\frac{X_i}{b^{1/3}} \cdot N \cdot F^{-1/3} \right) \quad (4.41)$$

Si se reemplazan las expresiones correspondientes al número de Froude y la longitud X_i , la expresión anterior queda

Para 90° y 45°

$$w_o = 1.5 \cdot X_i \quad (4.42)$$

para corrientes paralelas la relación que se puede aplicar es la siguiente

Para 0°

$$w_o = 0.7 \cdot X_i \cdot F^{-1/3} \quad (4.43)$$

4.4.1.5.5 Ambiente no estratificado

Las ecuaciones correspondientes al ambiente no estratificado se presentan en el Anexo 1

4.4.1.6 Análisis de la dilución en la zona lejana, S_2 .

Si una gota de colorante se deja caer en una cubeta con agua, después de cierto tiempo, t_1 , se estima que este colorante se ha dispersado completamente en toda el agua, el mecanismo físico por medio del cual se dispersa el colorante se llama difusión y el tipo de difusión que actúa, en este caso, es la difusión molecular, ahora si además dentro de la cubeta hay un sistema de mallas que están oscilando arriba y abajo, se producen unos pequeños remolinos que permiten que el colorante se disperse en un tiempo t_2 , el cual es mucho mas pequeño que el tiempo t_1 , este último tipo de dispersión es la que actúa en la zona lejana.

El coeficiente de difusión representa el tiempo de transporte de un contaminante a través de un área unitaria del medio receptor dividido entre el gradiente de la concentración del contaminante.

Esta dilución se extiende entre 100 y 10.000 metros a partir del difusor y su intervalo de desarrollo está entre 1 y 20 horas aproximadamente, los procesos por los que se produce son la advección por las corrientes oceánicas y la difusión debida a la turbulencia del océano.

4.4.1.6.1 Modelo de Brooks para la modelación del campo lejano

Un líquido con una concentración C_0 de un contaminante conservativo entra en una corriente con una velocidad u perpendicular a la línea de flujo, como el efluente es arrastrado hacia aguas abajo, este se extiende lateralmente debido a la difusión, por lo que la concentración pico sobre el eje principal decrecerá, ver Figura 4.8.

Además de asumir una velocidad constante normal al flujo, Brooks realiza las siguientes consideraciones, para resolver el problema de la concentración de un contaminante en una estación determinada.

El mezclado vertical es despreciable, esto es debido a que el coeficiente de difusión vertical es mucho menor que en el sentido horizontal, esto debido a que la densidad cambia con la profundidad.

La mezcla en la dirección de la corriente es despreciable siempre y cuando la velocidad a la cual el frente del contaminante avanza sea más grande que la velocidad de avance debido a la difusión turbulenta en la ausencia de advección

El efluente se mueve con el sistema de corrientes, esto implica que el efluente tiene la misma densidad que el cuerpo de agua en el cual se mueve.

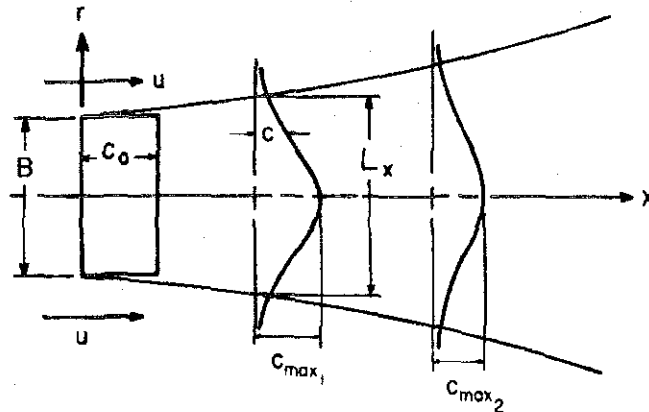


Figura 4.8. Variables para el modelo de Brooks, (1959)

Brooks propone la siguiente ecuación para describir la variación del coeficiente de difusión, ϵ .

$$\epsilon = \alpha \cdot L_x^{n_0} \tag{4.44}$$

y propone tres diferentes valores para n_0 : 0, 1 y 4/3, el primero corresponde a un coeficiente de difusión constante, el segundo a una situación de flujo con restricciones y el tercero en la mayoría de los casos, el cual es similar a la ley de Richardson.

Brooks se concentra en la determinación de la concentración de un contaminante sobre el eje principal de la pluma, esta es una medida conservativa, en términos de que predice la concentración de un contaminante hacia aguas abajo en una determinada estación, donde el valor máximo esta sobre el eje X , la distribución de la concentración C , tiene forma de campana, es decir, distribución normal ó gaussiana, el ancho nominal de la pluma en un punto dado es:

$$L_x = 2\sqrt{3}\sigma \tag{4.45}$$

donde σ es la desviación estándar del perfil de concentración en x , esta desviación en una distribución rectangular de ancho B , es:

$$\sigma = B/2\sqrt{3} \tag{4.46}$$

En la región del campo lejano, la dispersión lateral del efluente ocurre más allá del campo lejano durante el viaje horizontal de esta, lo cual genera una dilución adicional. Despreciando la difusión vertical y longitudinal y asumiendo que se mantiene una corriente uniforme, las relaciones de Brooks (1959) pueden ser usadas para calcular la dilución debida a la dispersión a través del eje central de la pluma.

Es comúnmente aceptado que para condiciones de aguas abiertas y que no haya límites en el esparcimiento del efluente, el coeficiente de dispersión, ϵ , se incrementa con la anchura de la pluma elevada a la 4/3 potencia y la dispersión del efluente debida a la dispersión se calcula con la siguiente expresión:

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Si ε se incrementa con la potencia 4/3, la dilución para el campo lejano esta dada por:

$$S_2 = \frac{1}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{1.5}{\left(1 + \frac{2}{3} \cdot \beta \cdot \frac{X_f}{w_o}\right)^3 - 1}}} \quad (4.47)$$

Para situaciones especiales donde los remolinos están encerrados y se puede asumir que el coeficiente de dispersión se incrementa linealmente con el espesor de la pluma, por ejemplo en emisores submarinos ubicados en bahías cerradas, la dilución debido a la dispersión se calcula con:

ε se incrementa linealmente

$$S_2 = \frac{1}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{1.5}{\left(1 + \beta \cdot \frac{X_f}{w_o}\right)^2}}} \quad (4.48)$$

En las 2 ecuaciones anteriores, el parámetro adimensional, β , se calcula con la ecuación (4.49):

$$\beta = \frac{12 \cdot \varepsilon_o}{U \cdot w_o} \quad (4.49)$$

La función de error se calcula con (4.50)

$$\operatorname{erf}\{a\} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-t^2} dt \quad (4.50)$$

Las Tablas para calcular la función de error, están disponibles en Abramowitz (1972), sin embargo, esta función puede ser evaluada numéricamente para la distribución de probabilidad normal

La difusividad de remolino para la difusión horizontal en el océano al principio del campo lejano, ε_o se representa, según Pearson (1956) como:

$$\varepsilon_o = \frac{0.01 \cdot (100 \cdot w_o)^{4/3}}{10^4} \quad (4.51)$$

Expresando las ecuaciones para S_2 en términos de las ecuaciones (4.49) y (4.51):

ε se incrementa con la potencia 4/3

406 3225
MAY 10 1956

$$S_2 = \frac{1}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{1.5}{\left(1 + 0.00371 \cdot \frac{X_f}{U \cdot w_o^{2/3}}\right)^3 - 1}}} \quad (4.52)$$

ε se incrementa linealmente

$$S_2 = \frac{1}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{1.5}{\left(1 + 0.00557 \cdot \frac{X_f}{U \cdot w_o^{2/3}}\right)^2 - 1}}} \quad (4.53)$$

En forma funcional, las expresiones para la dilución debida a la dispersión, se escribe como:

$$S_2 = f_1 \left(\frac{X_f}{U \cdot w_o^{2/3}} \right) \quad (4.54)$$

4.4.1.7 Dilución efectiva debido al decaimiento de los contaminantes, S_3

Para sustancias no conservativas o concentraciones de microorganismos, para los cuales un primer orden de decaimiento puede asumirse, el factor de dilución efectiva S_3 se calcula con la expresión (4.55) propuesta por Mancini (1978):

$$S_3 = \exp \left(2.303 \cdot \frac{t}{T_{90}} \right) \quad (4.55)$$

Donde se asume una corriente uniforme por lo que el tiempo de viaje t se puede calcular como una función la distancia X al emisor y una velocidad U , T_{90} es el tiempo requerido por el contaminante para reducir al 90% del valor inicial.

$$t = \frac{X}{U} \quad (4.56)$$

$$X = X_i + X_f \quad (4.57)$$

Reemplazando las ecuaciones (4.56) y (4.57) en (4.55) anteriores en la ecuación para calcular S_3 se obtiene:

$$S_3 = \exp\left(\frac{2.303}{3600} \cdot \frac{(X_i + X_f)}{U \cdot T_{90}}\right) \quad (4.58)$$

$$S_3 = \exp\left(\frac{2.303}{3600} \cdot \frac{X_i}{U \cdot T_{90}}\right) \cdot \exp\left(\frac{2.303}{3600} \cdot \frac{X_f}{U \cdot T_{90}}\right) \quad (4.59)$$

Además de los procesos anteriormente descritos, las partículas sólidas pueden sedimentarse y debido a su pequeño tamaño, este proceso dura entre 1 y 100 días y se extiende entre 10.000 y 100.000 metros alrededor del difusor

4.4.2 CORMIX

El Cornell Mixing Zone Expert System (CORMIX) es un sistema de programas para el análisis y predicción de contaminantes convencionales que son descargados en diversos cuerpos de agua. Los mayores énfasis se realizan en la geometría y las características de la dilución de la zona de mezclado inicial, por medio del programa CORJET, pero el sistema también predice el comportamiento de la descarga a grandes distancias (zona lejana, por medio del subprograma FFLOCATR).

CORMIX tiene los siguientes 3 subsistemas

- CORMIX 1: para descargas de un solo puerto sumergido.
- CORMIX 2: para descargas de múltiples puertos sumergidos.
- CORMIX 3: para descargas superficiales.

Inicialmente CORMIX fue diseñado para un ambiente único, pero actualmente se permite la modelación para ambientes más complicados, en los cuales las condiciones de marea, la recirculación y los efectos secundarios de contaminantes pueden considerarse.

La información completa del modelos CORMIX se encuentra en Doneker *et al* (1990), Akar *et al* (1991) y Jones *et al* (1996)

4.4.2.1 Longitudes de escala en CORMIX

Al igual que el modelo RSB, CORMIX utiliza parámetros de escala para caracterizar el comportamiento del flujo dentro del océano, los parámetros se relacionan con las variables L, m, b, U_j, U_a, y N.

Los parámetros de longitud que se aplican a los subsistemas CORMIX1 y CORMIX2 son los siguientes:

$$L_M = \frac{L^{1/4} m^{3/4}}{b^{1/2}} \quad (4.60)$$

El parámetro representado por la ecuación (4.60) relaciona la distancia a la cual el efluente deja de comportarse como un chorro y se convierte en una pluma.

$$L_m = \frac{(Lm)^{1/2}}{U_a} \quad (4.61)$$

La ecuación (4.61) asocia la distancia que un chorro penetra dentro de un flujo en sentido transversal antes de que este sea doblado y se convierta en un flujo deflectado

$$L_b = \frac{Lb}{U_a^3} \quad (4.62)$$

La ecuación (4.62) asocia la distancia que una pluma penetra dentro de un flujo-en sentido transversal antes de que este sea doblado y se convierta en un flujo deflectado.

$$L_m = \frac{(Lm)^{1/4}}{N^{1/2}} \quad (4.63)$$

El parámetro (4.63) relaciona la distancia que un chorro recorre antes de que este sea afectado por la estratificación en un ambiente donde el chorro tienda a ser "atrapado".

$$L_b = \frac{(Lb)^{1/4}}{N^{3/4}} \quad (4.64)$$

El parámetro (4.64) relaciona la distancia que una pluma recorre antes de que este sea afectado por la estratificación en un ambiente donde el chorro tienda a ser "atrapado".

Los siguientes parámetros solo se utilizan en CORMIX2, en el cual se utiliza el concepto de la ranura equivalente

$$l_M = \frac{m}{b^{2/3}} \quad (4.65)$$

El parámetro (4.65) asocia la distancia a la cual un chorro se convierte en pluma cuando este se asocia a al concepto de la ranura equivalente.

$$l_m = \frac{m}{U_a^2} \quad (4.66)$$

La ecuación (4.66) asocia la distancia que un chorro penetra dentro de un flujo en sentido transversal antes de que este sea doblado, si este se convierte en ranura equivalente

$$l'_m = \frac{m^{1/3}}{N^{2/3}} \quad (4.67)$$

El parámetro (4.67) relaciona la distancia que un chorro (tratado con el concepto de ranura equivalente) recorre antes de que este sea afectado por la estratificación en un ambiente donde el chorro tienda a ser "atrapado".

$$l_a = \frac{U_a}{N} \quad (4.68)$$

El parámetro (4.68) se asocia a la distancia que una pluma viaja antes de que sea afectada por una corriente transversal

Los parámetros (4.69) a (4.71) se aplican solamente a descargas superficiales, cuando se utiliza CORMIX3

$$L_M = \frac{(U_j Q)^{3/4}}{(g U_a)^{1/2}} \quad (4.69)$$

El parámetro (4.69) asocia a la distancia que la región inicial de mezclado se extiende antes de que esta se convierta en una capa inestable.

$$L_m = \frac{(U_j Q)^{1/2}}{U_a} \quad (4.70)$$

(4.70) Se asocia a la distancia que se extiende un chorro dentro de un flujo transversal antes de que de que este sea doblado por la corriente.

$$L_b = \frac{(g U_j)}{U_a^3} \quad (4.71)$$

El parámetro (4.71) es una medida de la tendencia de la descarga superficial a tener intrusión aguas arriba

4.4.2.2 Clasificación de los flujos según CORMIX

Las siguientes son las clases en la que cada uno de los subsistemas CORMIX clasifica el flujo

CORMIX1: 35 clases

- Clases S: Flujos atrapados en una capa con estratificación lineal
- Clases V,H: Flujos con flotación positiva en una capa con densidad uniforme, en sentido vertical u horizontal.
- Clases NV,NH: Flujos con flotación negativa en una capa con densidad uniforme, en sentido vertical u horizontal.
- Clases A: Flujos afectados por contacto con el fondo.

CORMIX2: 31 clases

- Clases MS: Flujos atrapados en una capa con estratificación lineal
- Clases MU: Flujos con flotación positiva en una capa con densidad uniforme, en sentido vertical u horizontal.

Clases MNU: Flujos con flotación negativa en una capa con densidad uniforme, en sentido vertical u horizontal.

CORMIX3: 9 clases

Clases FJ: chorros sin ninguna interacción con las orillas.

Clases SA: Flujos con interacción con la línea de costa.

4.4.2.3 CORJET

Como ya se ha mencionado, CORMIX usa los parámetros de longitud para determinar que modelos hidráulicos debe usar en las predicciones. Si un difusor es lineal con puertos unidireccionales en un ambiente estable, CORMIX realiza los cálculos en la región inicial usando un modelo integral tridimensional muy similar al UDKHG llamado CORJET, el cual deriva su nombre de "CORnel JET". Las siguientes son las principales diferencias entre CORJET y UDKHG:

- CORJET utiliza la distribución Gaussiana en vez de la distribución elevadas a las 3/2 que utiliza el UDKHG.
- Como es un submodelo de CORMIX, CORJET está limitada por las condiciones ambientales dadas en este (por ejemplo los 3 tipos de estratificaciones), CORJET puede correr como un modelo aparte, pero no considerará muchos valores de velocidad y densidad.
- CORJET no realiza cálculos específicos en la zona donde el flujo se establece como lo hace UDKHG, pero aproxima esto en un solo paso, calcula la longitud de la zona de dilución inicial con:

$$L_e = D \left(6.2 - 20 \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma}}{R} \right) R \quad (4.72)$$

con un ángulo relativo al eje x en el punto donde termina L_e .

$$\gamma_e = \gamma_o \left(1 - \frac{1.22 \sin \gamma_o}{R} \right); \quad R \geq 2 \quad (4.73)$$

donde R es la relación entre las velocidades del chorro y el ambiente y γ_o es el ángulo inicial de descarga.

- El Proceso de combinación de plumas no es gradual, este se da en el punto donde la longitud de la pluma es igual a la separación entre los puertos, a partir de este punto los cálculos se realiza como si fuera una pluma en dos dimensiones.
- CORJET permite utilizar el aire como fluido de trabajo y calcular la densidad de este a partir de su temperatura, el UDKHG el usuario es el que debe calcular la densidad del aire manualmente e introducir directamente los datos

4.5 Precisión y recomendaciones

4.5.1 Precisión

La pregunta que siempre está en el aire es ¿Qué tan exactas son las predicciones obtenidas con un modelo en específico?, la respuesta no es sencilla, las predicciones del comportamiento de un efluente de agua residual en el océano no son una ciencia exacta, no importa que método se utilice, las hipótesis y simplificaciones que se hacen son diferentes para diferentes tipos de flujo en situaciones específicas, por lo que hay modelos que dan mejores predicciones que otros bajo unas condiciones y si estas cambian, ya los resultados obtenidos no son los mejores. Ninguno da respuestas exactas, algunos de los problemas que existen se presentan a continuación.

Las mediciones en campo, por su misma naturaleza, no son exactas, si se quiere verificar si el comportamiento de la pluma una vez ya construido el difusor es el mismo que se predijo con la ayuda de los modelos, la localización de esta no siempre está en el lugar donde uno espera, hay fluctuaciones y limitaciones de los equipos de medición, los valores medidos puede que no sean los que se esperan.

Otro inconveniente es que los modelos matemáticos siempre dan valores medios de las variables que analizan y no los valores máximos que se puedan presentar. También, las mediciones en los laboratorios tienen problemas, como son los efectos de las paredes, problemas en la escala de las turbulencias presentadas y problemas de escala de geometría, los cuales pueden producir diferencias significativas entre las plumas reales y los plumas modelados en el laboratorio.

Los modelos tienen restricciones propias debido a su formulación, por ejemplo en los modelos integrales, como son PDSG, UDKHGM y UM se ignoran las fronteras o se incluyen estas de una manera aproximada, la hipótesis básica en este tipo de modelos es asumir perfiles similares de las variables necesarias a lo largo de la trayectoria de la pluma, esto significa que se asume que hay agua por todos lados, como resultado de esto, si los modelos están en capacidad de seguir funcionando una vez que el efluente entra en contacto con una pared, las predicciones que el modelo da son erróneas

Los modelos empíricos, como el RSB, que usan diferentes ecuaciones para diferentes tipos de flujo tendrán discontinuidades en las predicciones cuando se pasa de un tipo de flujo a otro y viceversa, las predicciones pueden ser buenas cuando los datos caen en la mitad de un tipo de flujo, donde las ecuaciones fueron generadas; pero las predicciones serán erróneas cuando se usan las ecuaciones para extrapolar fuera de los límites de cada flujo.

4.5.2 Recomendaciones

Lorin (1999) realiza las siguientes recomendaciones con respecto a los modelos que se pueden utilizar para la simulación del comportamiento de la descarga de un emisor submarino.

UM

Este modelo debe utilizarse para modelar descargas de difusores ubicados en una línea, donde el efecto de las fronteras pueda considerarse despreciable

RSB

Se debe utilizar este modelo para predecir las características de la dilución inicial, este modelo es útil para modelar difusores con ductos ascendentes que tienen múltiples puertos por ducto y que están sometidos a corrientes que pueden ir desde paralelas hasta perpendiculares al eje de la tubería.

Por el contrario, no debe utilizarse en descargas en ríos.

UDKHG

Se puede utilizar para predecir las características de la pluma para uno ó varios puertos, tanto en 2 como en 3 dimensiones. El usuario debe determinar manualmente cuando la descarga llega hasta la superficie o interfiere con alguna barrera.

PDSG

Este modelo se puede utilizar para determinar el campo de flujo en una descarga superficial, donde no existan barreras físicas que interfieran con el flujo.

CORMIX

La mayor ventaja de este sistema de programas es la habilidad para analizar casos complejos y casos con efectos de fronteras físicas, es un modelo muy versátil que se puede utilizar en la mayoría de los casos de descargas de emisores submarinos.

4.5.2.1 Rangos de aplicación para los modelos RSB, UM y CORMIX

A continuación se presentan los rangos de aplicación y las condiciones ambientales y geométricas que se deben tener en cuenta a la hora de aplicar un determinado modelo, es importante aclarar que la responsabilidad sobre la escogencia de un modelo recae sobre el diseñador, especialmente debe tener cuidado con la reglamentación vigente en el lugar de construcción del difusor, siempre se deben cumplir con lo estipulado en las normas.

4.5.2.1.1 MODELO RSB

En general, este modelo el cual se indica por las letras R y r en la Tabla 2 cuando es altamente recomendado o se debe utilizar con reserva respectivamente, es aplicable en todos los casos que están cerca de las condiciones de los experimentos usadas para el desarrollo de este, como se indica en Roberts et al (1989 a, b y c). Es importante indicar que este modelo solo se puede aplicar a descargas a través de múltiples puertos.

La Figura 4.9 puede usarse como guía rápida, una lista completa de todas los parámetros experimentales utilizados en el desarrollo de este modelo se encuentra en el apéndice 1 (tabla 5) de Roberts, Snyder y Baumgartner (1989 C).

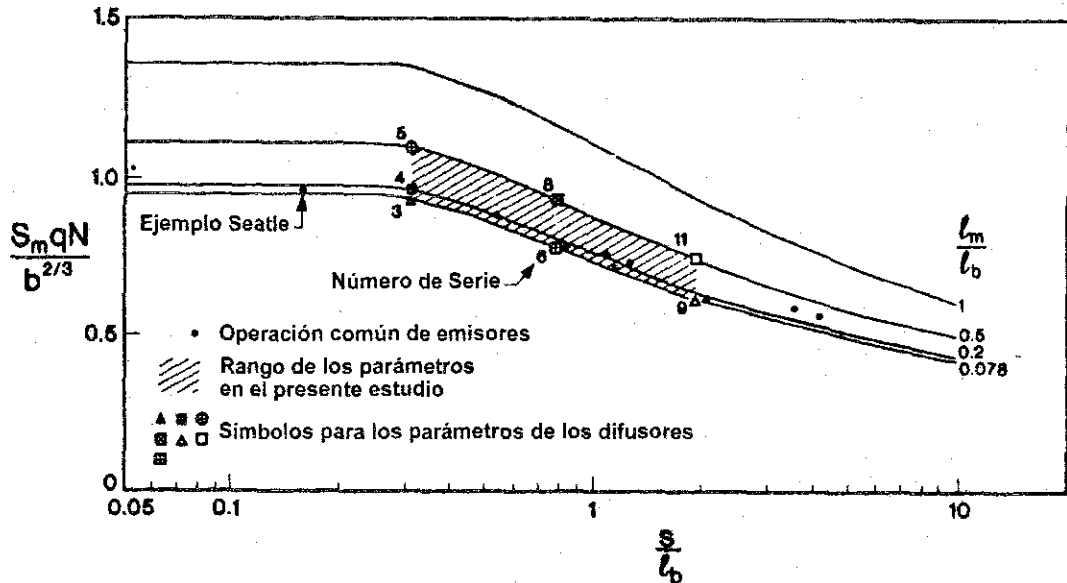


Figura 4.9. Predicción Numérica de la dilución (Wright et al 1982) y parámetros utilizados y rango de aplicación para Roberts et al 1989 a, b y c

Cuando el gradiente de densidad sobre la descarga puede ser representado por un gradiente lineal, el modelo RSB modela adecuadamente esta situación, también se pueden considerar difusores sumergidos con pequeño espaciamiento entre puertos.

Número de Serie	Parámetro Flujo de Cantidad de movimiento		Espaciamiento entre puertos	
	Lm/lb	Número de Froude	S/lb	Espaciamiento s (cm)
3	0.078	5	0.31	5
4	0.2	10	0.31	5
5	0.5	20	0.31	5
6	0.078	5	0.78	10
8	0.5	20	0.78	10
9	0.078	5	1.92	20
11	0.5	20	1.92	20

Tabla 4.1. Parámetros y espaciamiento de los puertos para estudio de Roberts et al 1989 a, b y c

4.5.2.1.2 Recomendaciones de modelos para descargas con un solo puerto

La Tabla 4.2, indica el modelo mas recomendable de acuerdo a las características ambientales presentes en el lugar de descarga para los modelos UM y CORMIX, los cuales se indican con las letras U y C respectivamente, si la letra esta en mayúsculas indica que el modelo se recomienda



satisfactoriamente, si está en minúsculas indica que se puede utilizar pero cautelosamente, ya que los resultados pueden no ser correctos, la letra d significa decaimiento en los contaminantes.

Condiciones Tipo de efluente	Estratificación			Corrientes		Otros recursos	C.F.	Int.	Aguas muy someras
	No	1,2	3,+	2-D	3-D				
Descargas que puedan flotar: alcantarillado residual, descargas industriales especialmente en aguas costeras	C U	C U	U	C U	C u	C(d.) U	C u	C u	u
Descargas Térmicas	C U	C U	U	C U	C u	C(d.) U	C u	C u	u
Descargas muy densas, alto contenido de sal, descargas industriales o descargas O.R	C U	C U	U	C U	C u	C(d.) U	C u	C u	u
Descargas en Densidad naciente o efectos no lineales de densidad: Descargas térmicas en aguas frías	U	U	U	U	U	U	u	u	u

Tabla 4.2. Recomendaciones para descargas de un solo puerto, Baumgartner et al 1994

4.5.2.1.2.1 Columnas de la Tabla 4.2

En esta tabla se ha dividido la estratificación en 3 columnas, la primera para ambiente no estratificado, la segunda para ambiente simple o doblemente estratificado y la tercera para ambientes con múltiples estratificaciones. El análisis con los parámetros de longitud puede utilizarse, como lo indica CORMIX, para definir estas 3 categorías mas precisamente.

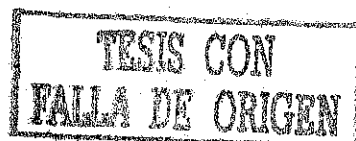
Para las corrientes, se ha realizado 2 subdivisiones, la primera corresponde a la subdivisión 2D en la cual la corriente esta en el sentido de la descarga o es lo suficientemente débil como para no intervenir en la trayectoria de la pluma, ni afecta al dilución inicial. La otra división corresponde a 3-D y es aquí cuando la corriente está en el sentido perpendicular a la descarga y que esta afecta la trayectoria

La columna siguiente, se utiliza cuando los niveles de contaminación presentes en el cuerpo de agua donde se realiza la descarga son considerables.

La columna de las condiciones de frontera (CF) se utiliza cuando las fronteras, el fondo, la superficie y/o los lados juegan un papel importante en el modelación de la pluma.

La columna de intrusión indica las porciones de la pluma que se separarán de esta y a su vez formarán otras plumas que pueden ser estables o inestable, si se quiere una estimación de este fenómeno se debe utilizar CORMIX, si lo que se desea es predecir la dilución UM provee una adecuada aproximación en función de la cantidad de agua disponible para el arrastre debido a las corrientes o la aspiración.

La última columna se refiere a la descarga en aguas muy someras, la cual se define como aguas cuyo tirante es menor a 3 veces el diámetro de la descarga.



4.5.2.1.2.2 Filas de la Tabla 4.2

Las tres primeras filas se explican por si mismas, el término descarga R.O se refiere a las plumas con alto contenido de sal que se crean por un proceso de desalinización de osmosis reversa.

La fila número cuatro, se refiere a la densidad naciente, aunque este efecto aun falta ser estudiado mas profundamente. A bajas temperaturas, generalmente entre 0 y 4 grados centígrados, las plumas pueden tener una tendencia a dirigirse hacia abajo, en vez de hacia arriba, así la el ambiente no tenga una fuerte estratificación, este efecto es importante en regiones frías.

4.5.2.1.3 *Recomendaciones de modelos para descargas con múltiples puertos*

En la Tabla 4.3 se dan las recomendaciones para los modelos a utilizar con descargas en múltiples puertos, se incluye ahora el modelo RSB y columnas referentes a la unión de plumas.

Condiciones Tipo de efluente	Estratificación			Corrientes		Unión		Otros recursos	C.F	Intru-Sión	Puertos no ll's
	No	1,2	3,+	Perp	Parll	Parcial	Total				
Descargas que puedan flotar: alcantarillado residual, descargas industriales especialmente en aguas costeras	C U R	C U R	U R	C U R	C R	U R	C U R	C(d.) U	C u	C U R	C
Descargas Térmicas	C U r	C U r	U r	C U R	C R	C U R	C U R	C(d.) U	C u	C U R	C
Descargas muy densas, alto contenido de sal, descargas industriales o descargas O.R	C U R	C U R	U r	C U r	C r	C U R	C U R	C(d.) U	C u	C U R	C
Descargas en Densidad naciente o efectos no lineales de densidad: Descargas térmicas en aguas frías	U	U	U	U	u	U	U	U	u	U	

Tabla 4.3. Recomendaciones para descargas con múltiples puertos, Baumgartner et al 1994

La columna de corrientes cambia para indicar la importancia del alineamiento del difusor en el comportamiento de la pluma, los difusores con flujo en cruz cubren el rango de 90 a 45 grados, los otros ángulos se cubren en la columna paralelo.

La columna de unión de plumas indica el grado de unión, si este es parcial o total, vale la pena indicar que RSB se considera particularmente apropiado para emisores en forma de túnel con múltiples puertos.

Con respecto a la columna de intrusión, solo CORMIX provee una estimación de la longitud de penetración, sin embargo RSB y UM proveen la dilución en el campo de flujo. Si la pluma llega a la superficie UM es importante en este punto, sin embargo la dilución puede reducirse en un 10 por ciento para asegurar que el análisis es conservador, Baumgartner et al 1994

La última columna se refiere a difusores cuyos puertos no son perpendiculares a eje de este, de los modelos en consideración, solo CORMIX es aplicable en este caso



4.5.2.1.4 Recomendaciones de modelos para descargas Superficiales

El subprograma CORMIX 3 se recomienda para la modelación de descargas superficiales.

4.5.2.1.5 Velocidad de Análisis

Si se desea saber el porcentaje de tiempo que una pluma llega a la superficie del mar, esto se logra a partir de datos horarios recogidos en un estudio de campo, si se utiliza CORMIX sería necesario realizar cientos de simulaciones, las cuales tomarían mucho tiempo, con VISUAL PLUMES se pueden realizar fácilmente

CAPÍTULO 5 CASOS DE APLICACIÓN

100 200
1000 2000

5 CASOS DE APLICACIÓN

Los conceptos y modelos descritos en este trabajo se aplican a varios ejemplos prácticos, iniciando por el caso más sencillo que es la modelación de la descarga de un solo puerto y terminando en la modelación de la descarga producida por un difusor con múltiples puertos para la ciudad de Veracruz.

5.1 Programas y modelos utilizados

Por medio del programa Visual Plumes (VP), el cual fue desarrollado por Frick, Roberts, Davis, Keyes, Baumgartner y George en el 2001, y el programa CORMIX desarrollado por Doneker y Jirka en 2002, se modela el comportamiento de la pluma de agua residual en un ambiente estratificado bajo diversas condiciones de corrientes y configuraciones del difusor. Los modelos con los cuales puede trabajar el programa VP son el UM3, DKHW, NRFIELD, PDSG y el modelo de Brooks, los modelos DKHW y NRFIELD están basados en el modelo UDKHG y en el modelo RSB, respectivamente.

5.2 Descarga de un puerto

En un principio, los difusores están integrados por una tubería que transporta un efluente, la descarga se realiza con un solo puerto. Es conveniente señalar que esta concepción es ineficiente particularmente por el riesgo que se corre si el puerto se llega a obstruir, ya que de ocurrir esto el sistema se colapsa totalmente.

Para este ejemplo, se considera una descarga de aguas residuales residencial con un consumo de 200 lts/hab*día, y una población a la que sirve el sistema de saneamiento litoral de 21.600, también se considera que el efluente proviene de una planta de tratamiento de aguas residuales con tratamiento primario.

5.2.1 Datos difusor

Variable	Valor
Diámetro del Puerto (m)	0.20
Elevación de Puerto (m)	1.0
Ángulo Vertical (°)	90.0
Ángulo Horizontal (°)	90.0
Zona Dilución Inicial (m)	10.0
Zona de Mezclado (m)	50.0
Profundidad del puerto (m)	9.0
Población (hab)	21.600
Caudal descargado (m ³ /s)	0.05
Densidad efluente (kg/m ³)	1000.0
Temperatura efluente (°C)	25
Concentración Contaminantes (ppm)	100

Tabla 5.1. Datos del difusor

Se utilizan los modelos UM3, DKHW y el programa CORMIX para este caso de aplicación, las figuras que se obtienen son para el comportamiento de la pluma, en planta, perfil, la variación de la densidad y la dilución obtenida.



5.2.2 Ambiente no Estratificado

5.2.2.1 Datos Ambientales

Variable	Profundidad (Superficie)	Profundidad (fondo)
Velocidad campo cercano (m/s)	0.5	0.5
Dirección campo cercano (°)	90.	90
Densidad (kg/m ³)	1025.0	1025.0
Temperatura (°C)	25.0	25.0
Concentración contaminante (ppm)	0.0	0.0
Tasa decaimiento contaminante (s ⁻¹)	0.0	0.0
Velocidad campo lejano (m/s)	0.5	0.5
Dirección campo lejano (°)	90	90
Coefficiente de difusión campo lejano (m ² /s ²)	0.0003	0.0003

Tabla 5.2. Datos ambientales

Normalmente, un ambiente no estratificado ocurre durante los meses correspondientes al final del otoño y todo el invierno, en estos, la densidad del agua es constante en toda la columna de agua y es donde se espera que la pluma tenga las mayores probabilidades de alcanzar la superficie.

En la Figura 5.1, se presenta el comportamiento en perfil de la pluma, con la línea roja (círculos) se indica el modelo UM3 y con la línea azul (triángulos) el modelo DKHW, se observa que debido a la nula estratificación, la pluma alcanza la superficie, en una distancia de 51.33 m y 100.3 metros, para los modelos UM3 y DKHW respectivamente. la línea continua representa el eje central de la pluma para cada modelo

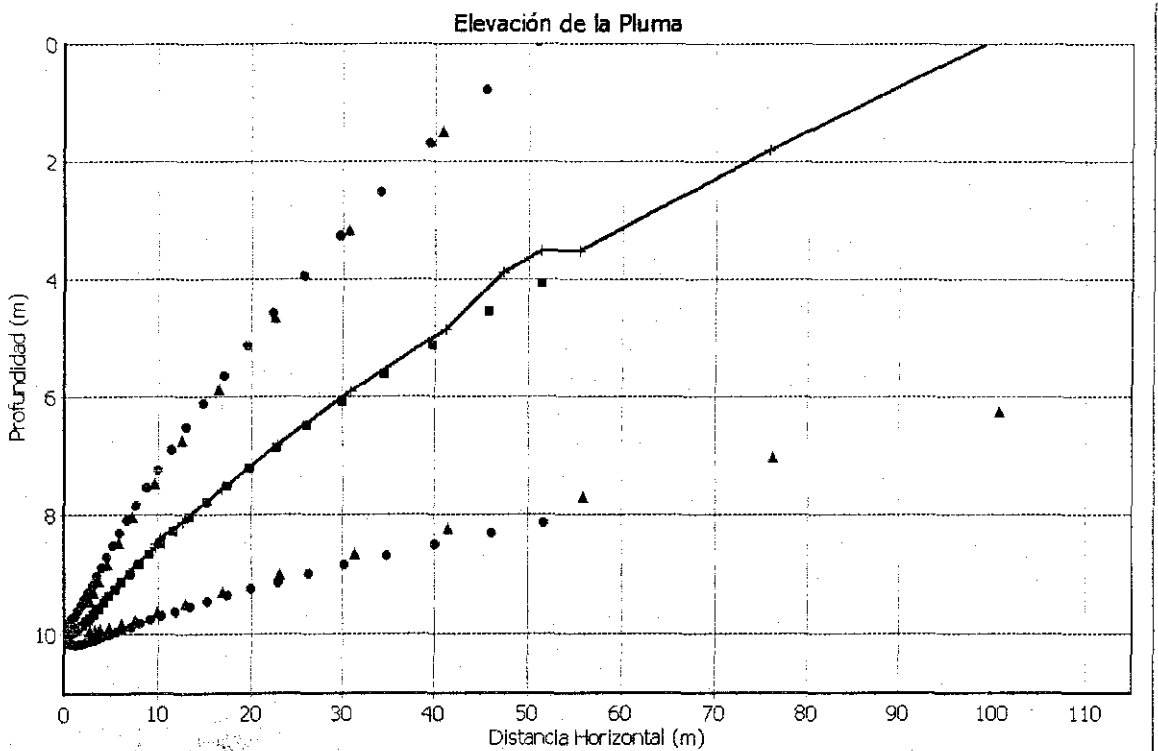


Figura 5.1. Comportamiento en perfil para descarga de un solo puerto no estratificada.



En la Figura 5.2 se muestra el comportamiento de la pluma cuando se utiliza CORMIX, la distancia a la cual, según este programa, se alcanza la superficie libre es aproximadamente de 50.65 metros.

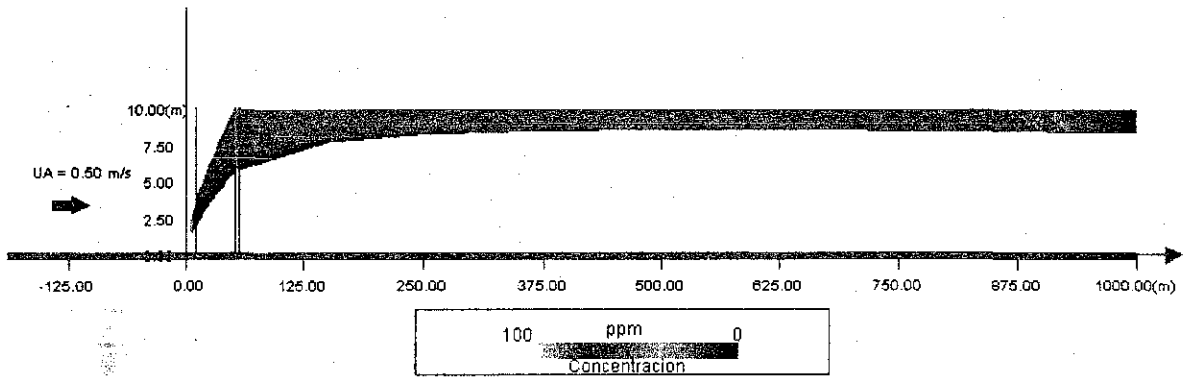


Figura 5.2 Comportamiento en perfil con el programa CORMIX

En la Figura 5.3 se muestra el comportamiento de la pluma en planta, se observa, tal como se predice por el ángulo de 90 grados que tiene la corriente con respecto al difusor, que la pluma es simétrica. Ambos modelos indican un comportamiento similar de la pluma

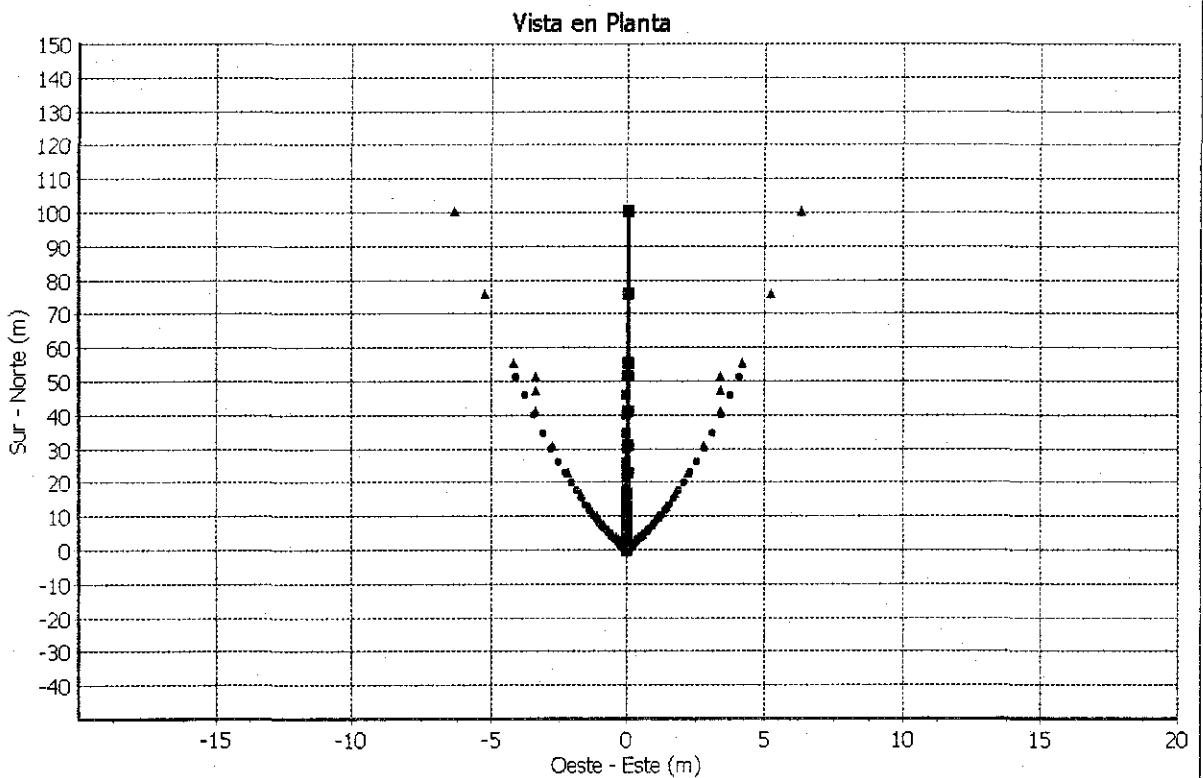


Figura 5.3. Comportamiento en planta para una descarga de un solo puerto no estratificada

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la Figura 5.4, se muestra el comportamiento en planta, en una región de 1000 m. Cuando se utiliza CORMIX, se observa un comportamiento simétrico, al igual que el presentado por los modelos UM3 y DKHW.

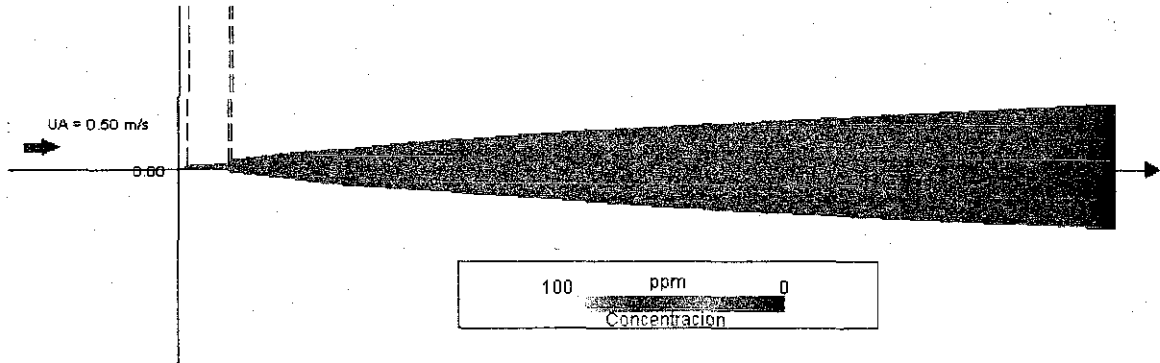


Figura 5.4 Comportamiento en planta con el modelo CORMIX

En la Figura 5.5 se presenta el comportamiento de la densidad del efluente, se observa como cambia el valor de 1000 kg/m³ que tiene el efluente a la salida, hasta un valor de 1025 kg/m³ a una profundidad de 7 metros para cada uno de los modelos, esto debido a la gran dilución a la que se ve sometida la descarga.

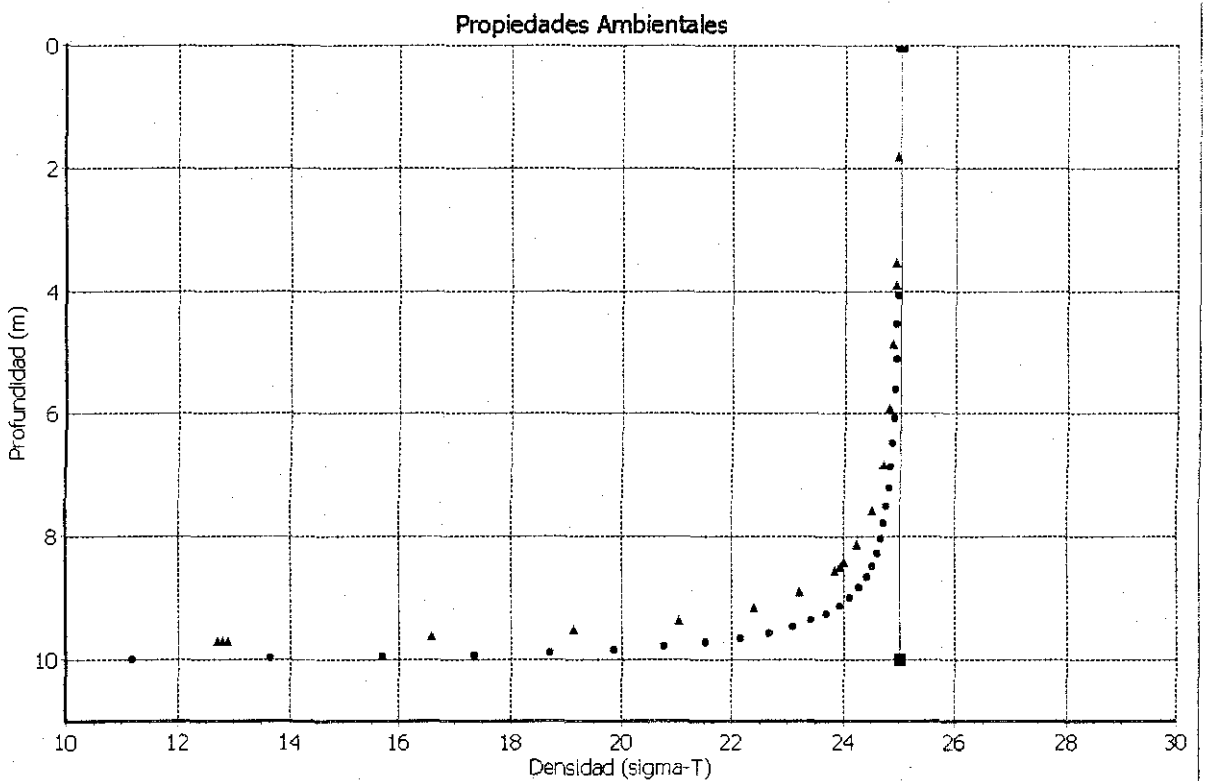
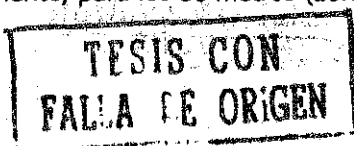


Figura 5.5. Densidad vs. profundidad para una descarga de un solo puerto no estratificada

En la siguiente figura se observa la dilución como función de la distancia horizontal. Se observa que la dilución a los 10 metros (zona de dilución inicial) es de 50.22 y 47.62 para los modelos UM3 y DKHW respectivamente, para los 50 metros (zona de mezclado) son de 519.5 y 556.1, respectivamente, para



el modelo DKHW, a los 100 metros se predice una dilución de 1267.5, lo que quiere decir que la concentración del contaminante es de 0.789 ppm o 7.89e-5%.

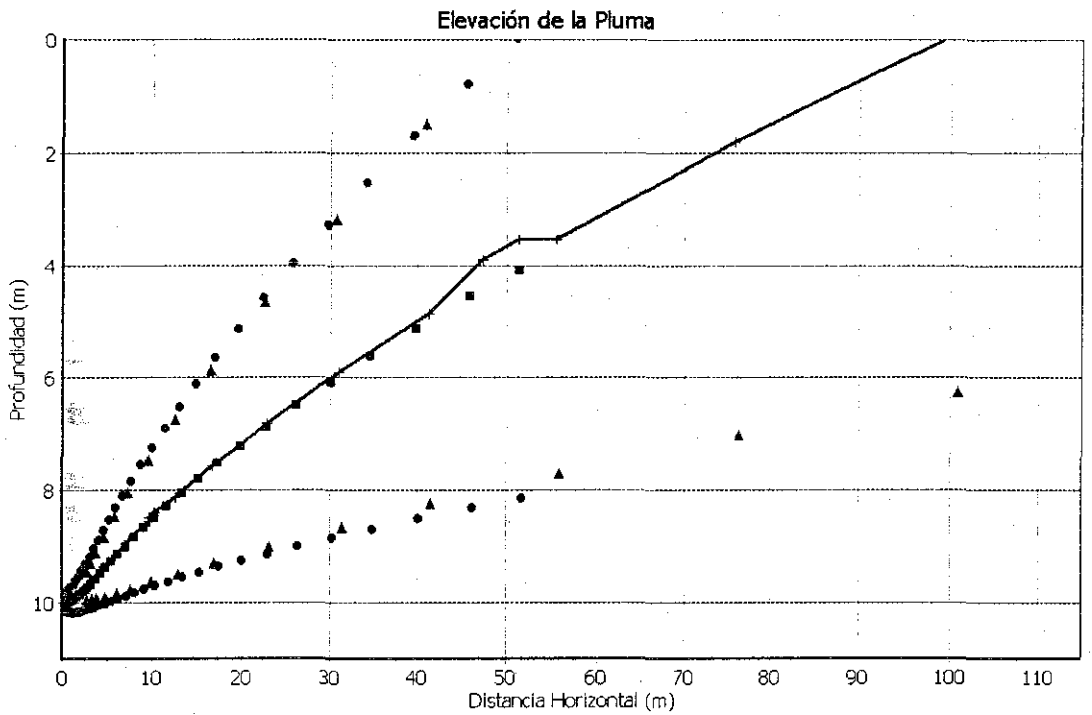


Figura 5.6. Dilución vs. distancia horizontal para una descarga de un solo puerto no estratificada

En la Figura 5.7 se indica la dilución como función de la distancia predicha por CORMIX, a los 10 metros se tiene una dilución de 28, a los 50 metros una dilución de 205.

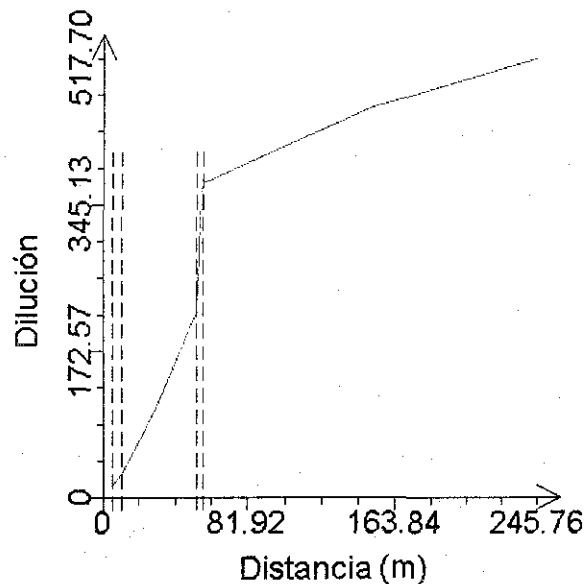


Figura 5.7 Dilución predicha por CORMIX

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.2.3 Ambiente Estratificado

5.2.3.1 Datos Ambientales

Variable	Profundidad (4 m)	Profundidad (6 m)
Velocidad campo cercano (m/s)	0.5	0.5
Dirección campo cercano (°)	90.	90
Densidad (kg/m ³)	1023.3	1025.0
Temperatura (°C)	25.0	25.0
Concentración contaminante (ppm)	0.0	0.0
Tasa decaimiento contaminante (s ⁻¹)	0.0	0.0
Velocidad campo lejano (m/s)	0.5	0.5
Dirección campo lejano (°)	90	90
Coefficiente de difusión campo lejano (m ² /s ²)	0.0003	0.0003

Tabla 5.3. Datos ambientales

Las cuatro figuras siguientes se presentan para el caso de ambiente estratificado, la cual es la situación más probable durante los meses de primavera y verano, esta es una ventaja, ya que son los meses donde la afluencia de turistas es mayor en las ciudades costeras, y donde, según la Figura 5.8, la descarga no alcanza la superficie del mar, esta es sumergida.

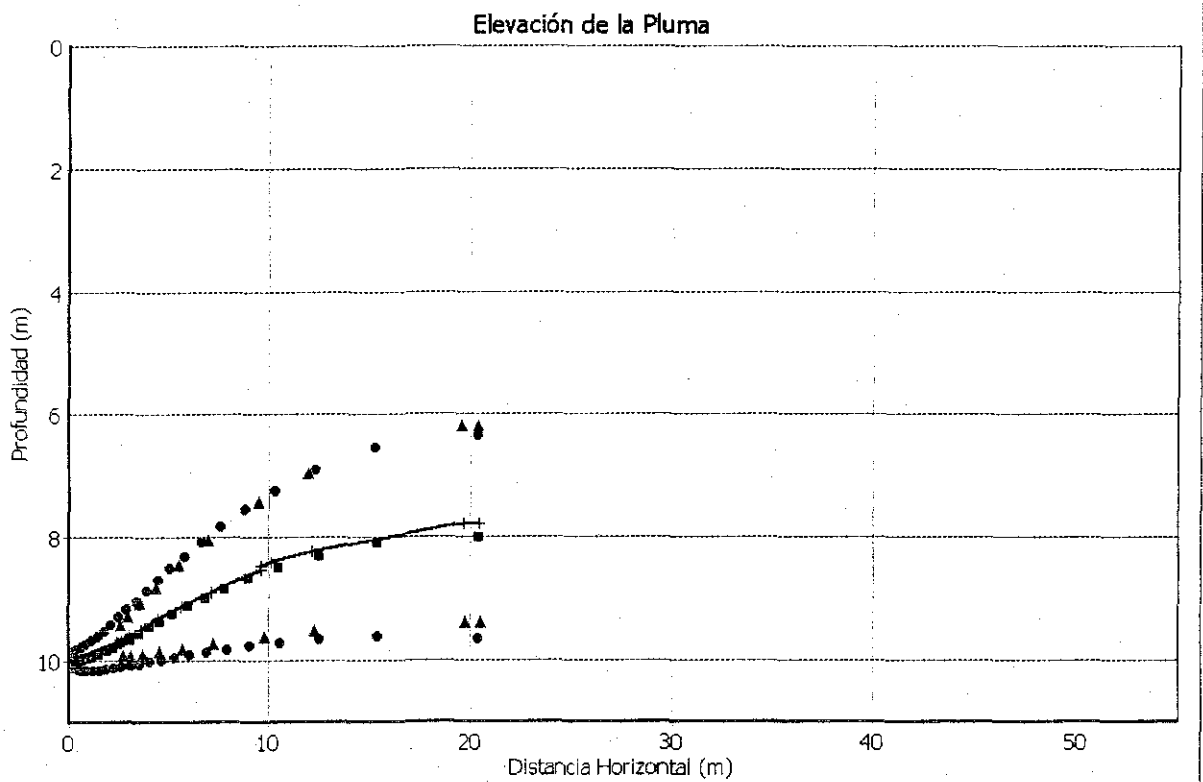


Figura 5.8. Comportamiento en perfil para descarga de un solo puerto estratificada.

El nivel de atrapamiento promedio (centro de la pluma) se da en para el modelo UM3 a 8.4 metros de profundidad, mientras que para el modelo DKHW se da a 8.23 metros de profundidad. Se observa que



para ambos modelos, se produce un hundimiento de la pluma a una distancia de 20.40 metros de la descarga, lo que conlleva a que los cálculos se detengan, lo cual no implica que hasta ahí llega la pluma, solo que como condición de frontera no puede presentarse lo indicado en la Figura 6 del capítulo Modelos.

En la Figura 5.9 se muestra el comportamiento de la pluma cuando se utiliza CORMIX, al igual que en la figura anterior, hay un nivel de atrapamiento, que se encuentra a los 5.93 metros de profundidad.

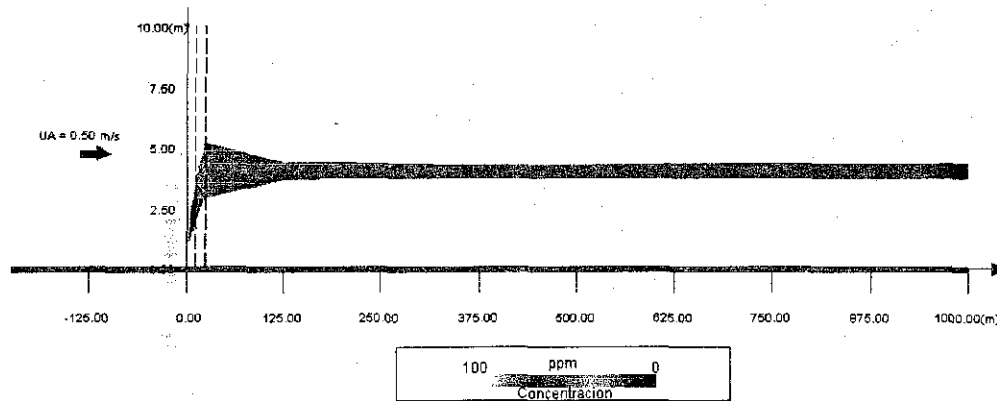


Figura 5.9 Comportamiento en perfil con ambiente estratificado

La Figura 5.10 muestra el comportamiento en planta de la descarga, al igual que en la Figura 5.3 se observa que es un comportamiento simétrico que también se interrumpe a una distancia de 20.4 metros.

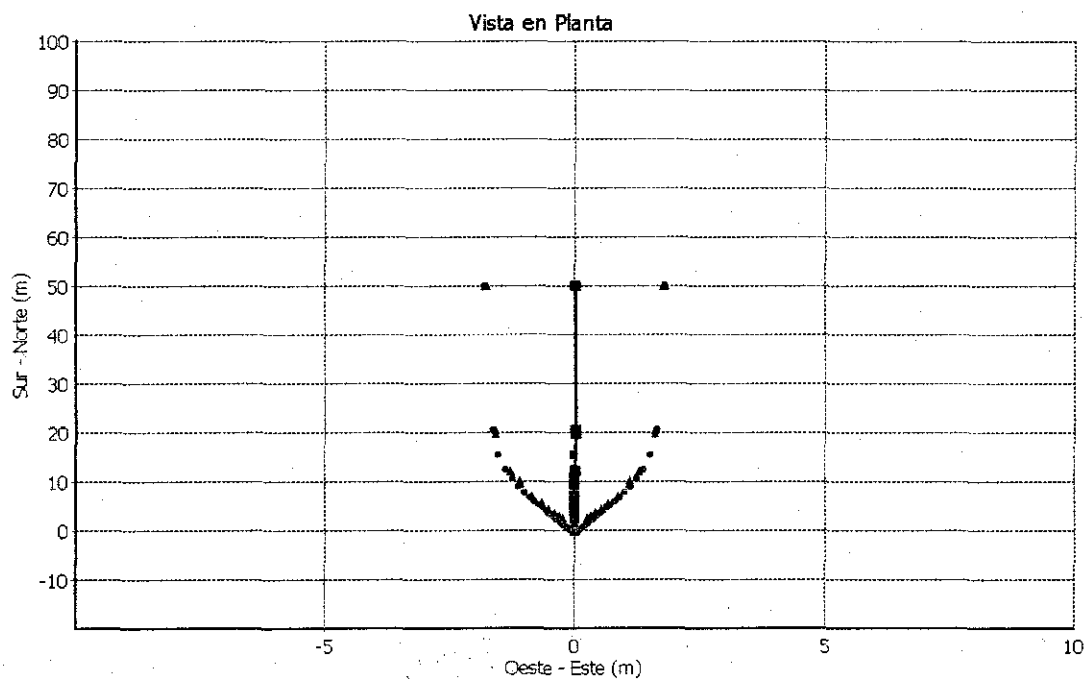


Figura 5.10. Comportamiento en planta para una descarga de un solo puerto estratificada

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

La Figura 5.11 indica el comportamiento de la densidad en un ambiente estratificado, se observa que a una profundidad de 8.2 metros se alcanza la densidad ambiental, similar al lugar donde se produce el nivel de atrapamiento

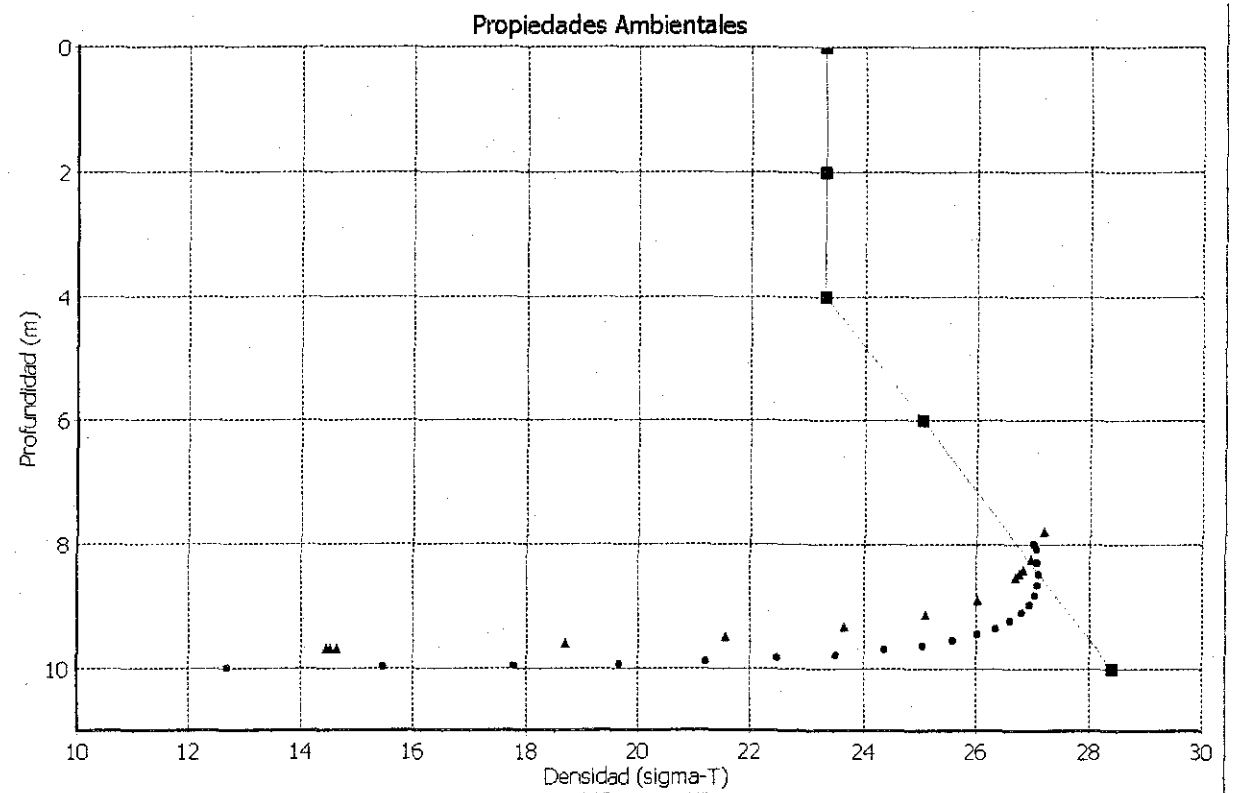


Figura 5.11. Densidad vs. Profundidad para una descarga de un solo puerto estratificada.

La dilución, según Figura 5.12 se alcanza al descargar en un ambiente estratificado es menor que para el caso contrario. Esto debido a que la cantidad de agua que es posible arrastrar hacia el interior de la pluma es mucho menor, el hecho de que la pluma no alcance la superficie es contraproducente para la dilución, para obtener la concentración máxima permitida se necesitará de una mayor distancia de recorrido o corrientes mayores.

La dilución alcanzada en promedio es 85, lo cual indica que para la concentración inicial de 100 ppm a 20.4 metros se tiene una concentración de 1.17 ppm. Para la zona de dilución inicial (10 metros) la dilución según los modelos UM3 y DKHW es de 49.11 y 46.77, respectivamente.

La Figura 5.13 muestra la dilución calculada con CORMIX para el caso de densidad estratificada, la dilución a los 10 metros es 28 y a los 50 metros es de 120 aproximadamente

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

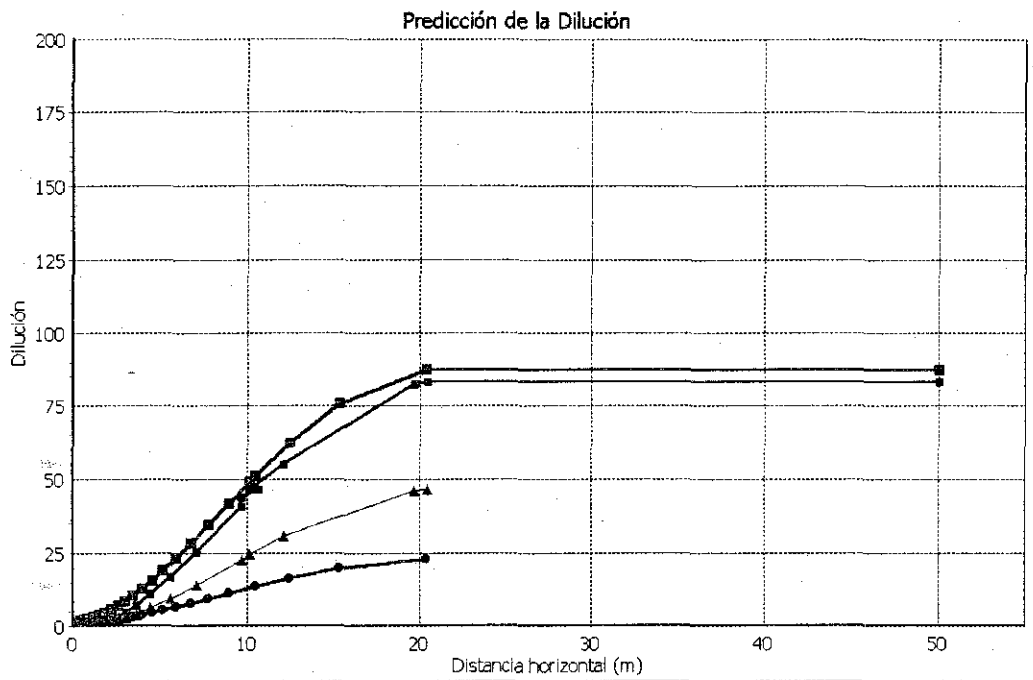


Figura 5.12. Dilución vs. distancia horizontal para una descarga de un solo puerto estratificada

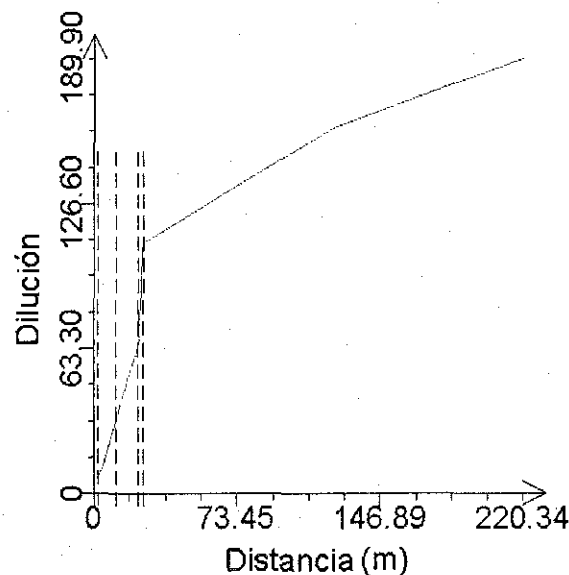


Figura 5.13 Dilución predicha por CORMIX para ambiente estratificado

5.3 Descarga con varios puertos

En este caso, se utilizan los modelos UM3, DKHW, RSB y CORMIX para obtener los datos correspondientes a la dilución, y características físicas de la pluma, tanto para el ambiente no estratificado como estratificado

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

5.3.1 Datos del difusor

Variable	Valor
Diámetro del Puerto (m)	0.10
Elevación de Puerto (m)	1.0
Ángulo Vertical (°)	90.0
Ángulo Horizontal (°)	90.0
Número de Puertos	10
Distancia entre puertos (m)	2.0
Zona Dilución Inicial (m)	10.0
Zona de Mezclado (m)	50.0
Profundidad de los puertos (m)	9.0
Población (hab)	43200
Caudal descargado (m ³ /s)	0.10
Densidad efluente (kg/m ³)	1000.0
Temperatura efluente (°C)	25
Concentración Contaminantes (ppm)	100

Tabla 5.4. Datos del difusor

5.3.2 Ambiente no estratificado

La distribución en perfil de una descarga de un emisor con múltiples puertos se esquematiza en la Figura 5.14. De esta figura se observa, al igual que en la Figura 5.1, que las plumas se combinan a 14.3 metros y 15.85 metros, según los modelos UM3 y DKHW, respectivamente. Para el modelo UM3, la pluma alcanza la superficie a los 72 metros de la descarga, según el modelo DKHW, la pluma alcanza su nivel máximo a los 181 metros, es aquí, donde se interrumpe el cálculo. El modelo RSB predice también que la pluma alcanza la superficie a una distancia de 224.2 metros del campo inicial de mezclado.

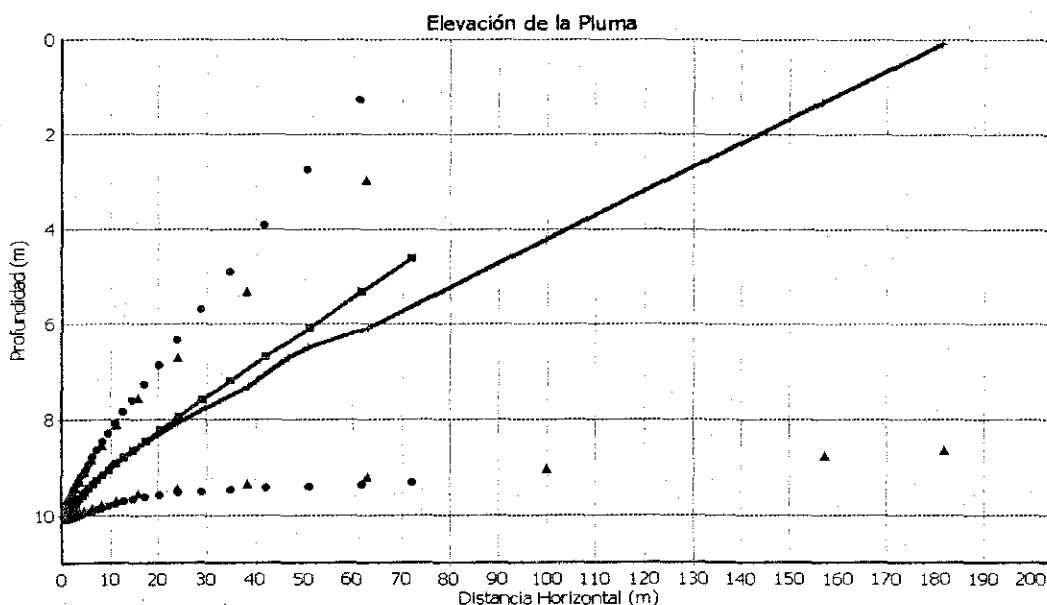


Figura 5.14. Comportamiento en perfil para descarga de 10 puertos no estratificada.



En la Figura 5.15, se presenta el comportamiento en planta predicho por CORMIX, la pluma alcanza la superficie aproximadamente a los 50 metros

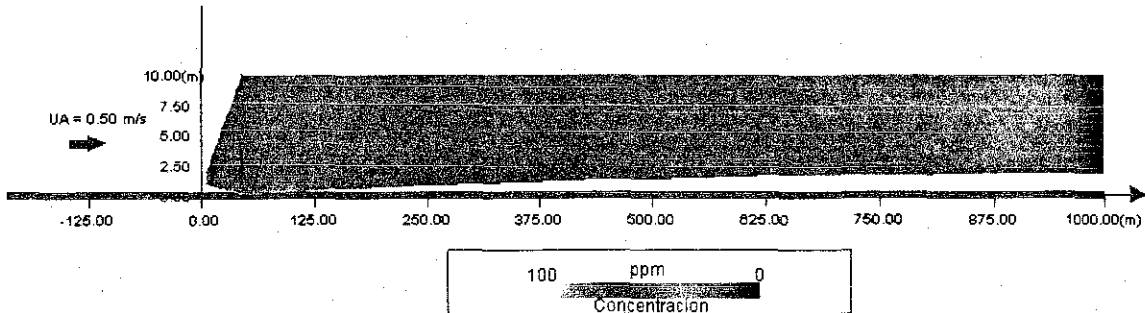


Figura 5.15 Comportamiento en perfil para múltiples puertos

En la Figura 10 se presenta la vista en planta para una descarga con múltiples puertos, se ve que es simétrica con respecto al eje de propagación.

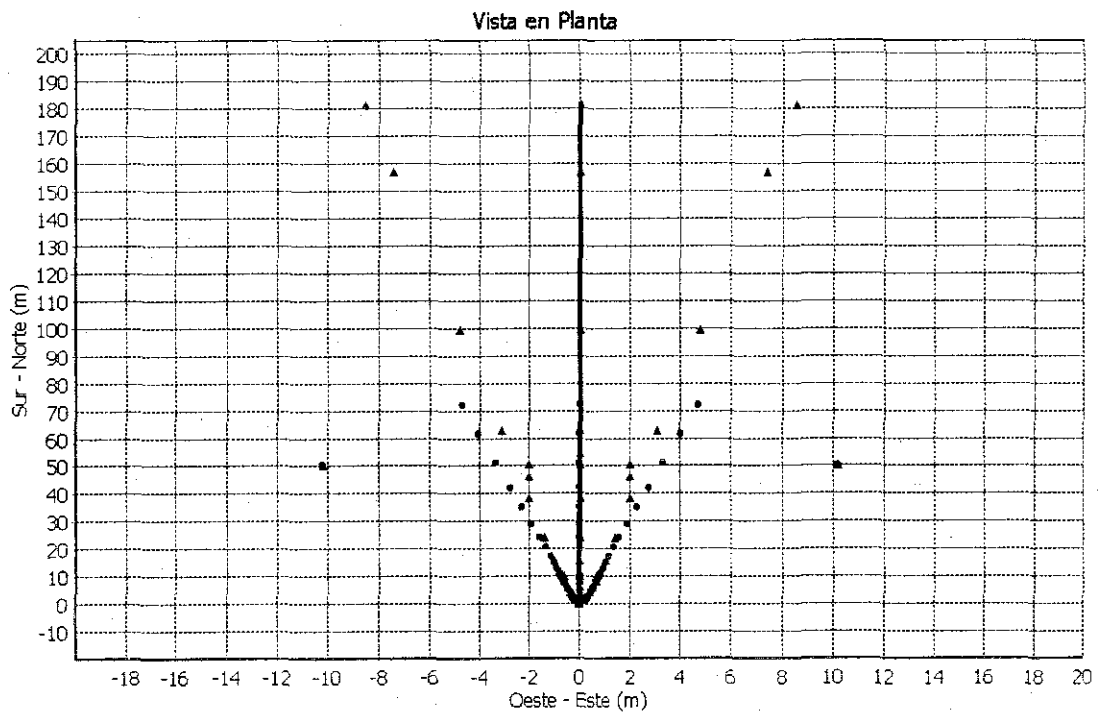


Figura 5.16. Comportamiento en planta para descarga de 10 puertos no estratificada.

Con respecto a la densidad, al igual que en la Figura 5.5, se observa que para 7 metros de profundidad la densidad es prácticamente la densidad ambiental

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

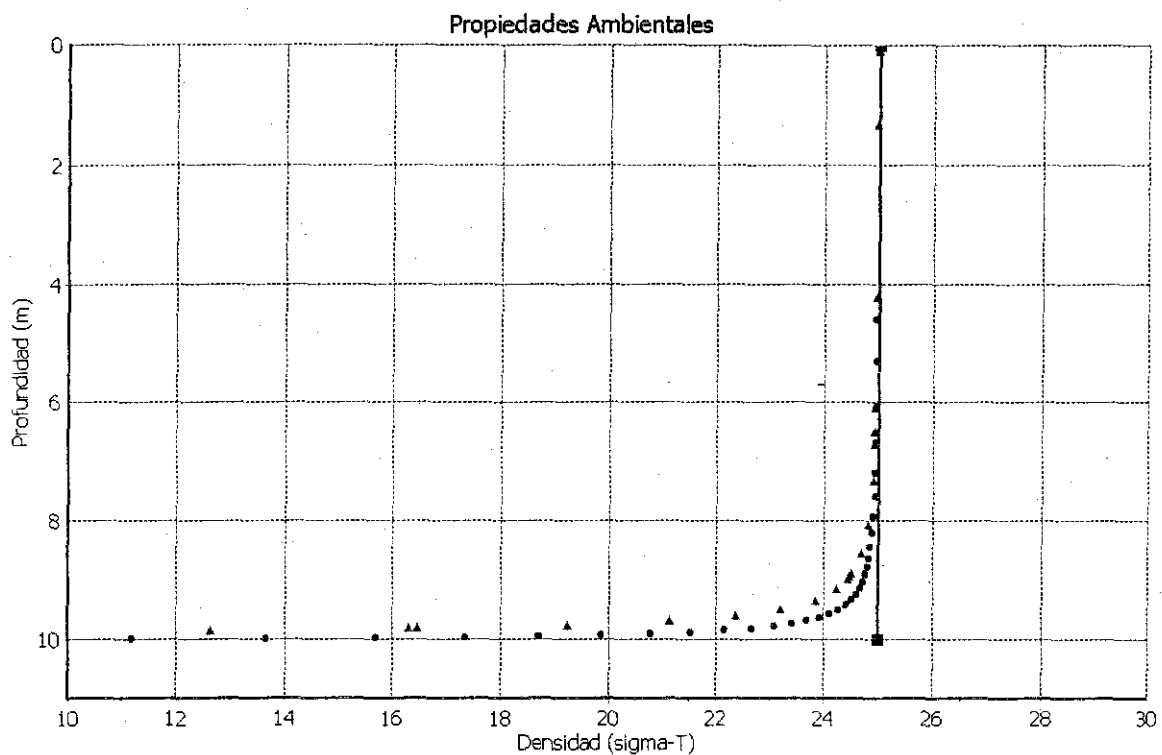


Figura 5.17. Densidad vs. profundidad para una descarga de 10 puertos no estratificada

La Figura 5.18 indica el nivel de dilución que se obtiene para este caso, las cuales para la zona de dilución inicial son 98.48 y 92.94 según los modelos UM3 y DKHW, mientras que para la zona de mezclado son 672 y 542.9 para los mismos modelos. Las máximas diluciones que se alcanzan son para el modelo UM3 959.7 a 71.97 metros, cuando llega a la superficie, para el modelo DKHW es 1714. a 181.4 metros, también cuando la pluma alcanza la superficie.

Según el modelo RSB la dilución que se logra al final de la zona inicial de mezclado es de 381 La Figura 5.19 muestra el comportamiento de la dilución en función de la distancia horizontal para el programa CORMIX, se observa la gran eficiencia que se obtiene con múltiples difusores

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

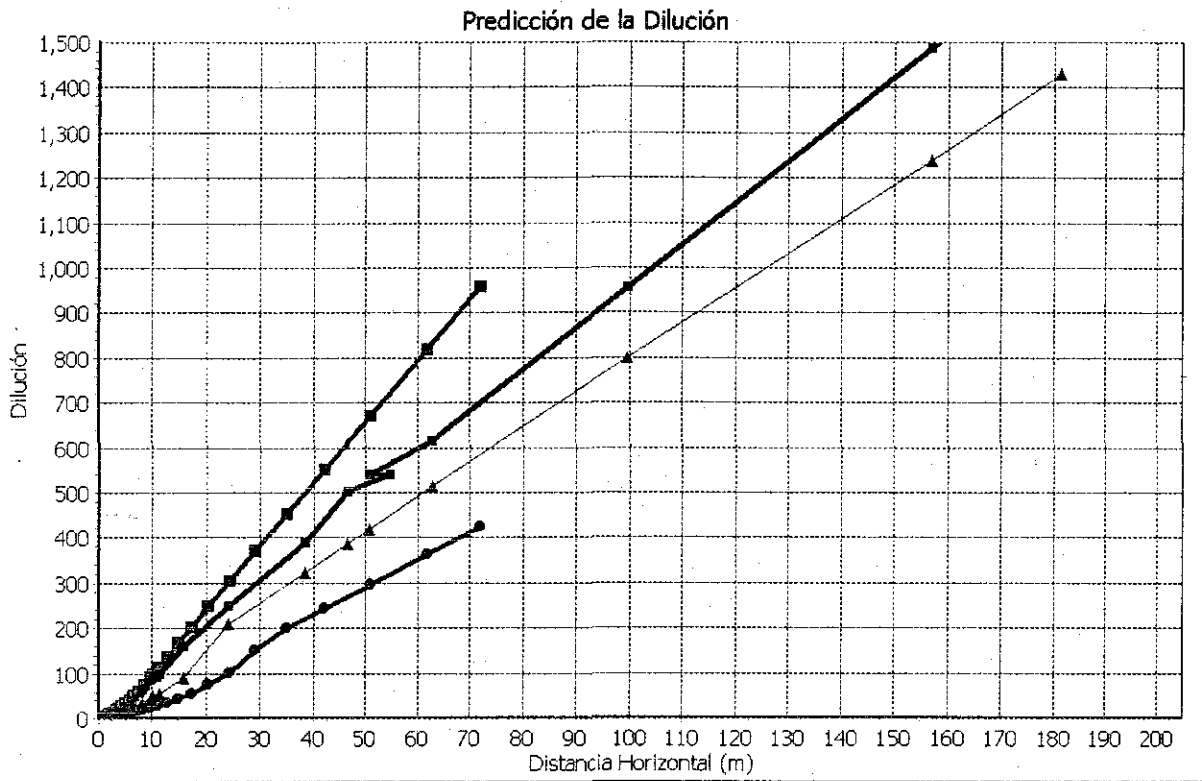


Figura 5.18. Dilución vs. distancia horizontal para una descarga de 10 puertos no estratificada

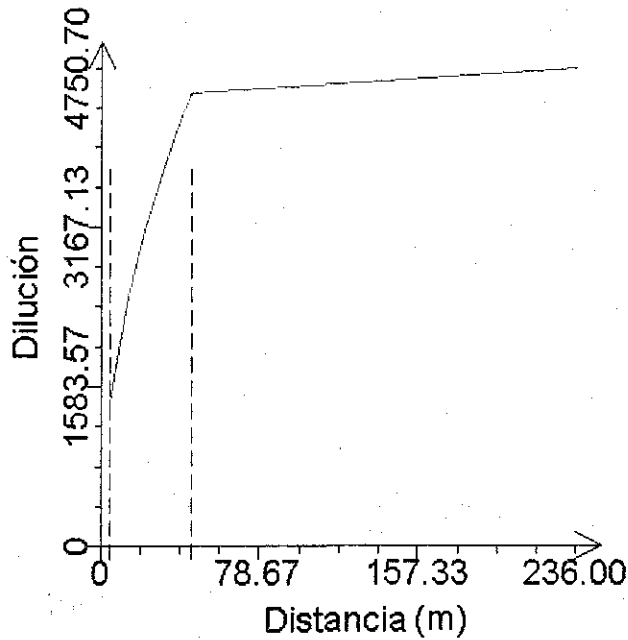


Figura 5.19 Dilución para ambiente no estratificado y múltiples puertos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.3.3 Ambiente estratificado

Para la descarga durante los meses de verano, en la Figura 5.20 se presenta el comportamiento en perfil de la pluma. Se observa que la pluma presenta un nivel de atrapamiento a una profundidad de 9 y 8.9 metros para los modelos UM3 y DKHW, respectivamente, y las plumas muestran un comportamiento similar al de la figura 6 del capítulo Modelos. También se puede observar que a una distancia de 19.02 y 19.31 metros, aún las plumas no se han combinado en esta abscisa.

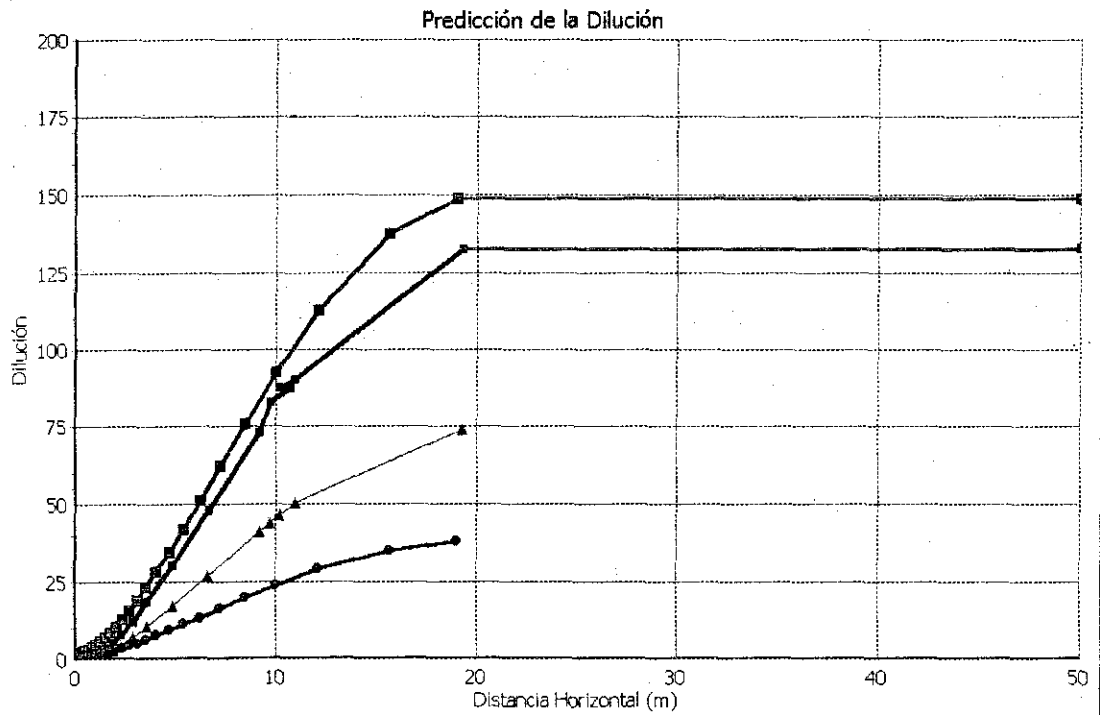


Figura 5.20. Comportamiento en perfil para descarga de 10 puertos estratificada

La Figura 5.21 muestra el comportamiento de la pluma cuando se utiliza CORMIX, la unión de las plumas se presenta a 24.5 metros, se produce el nivel de atrapamiento a 6.96 metros de profundidad.

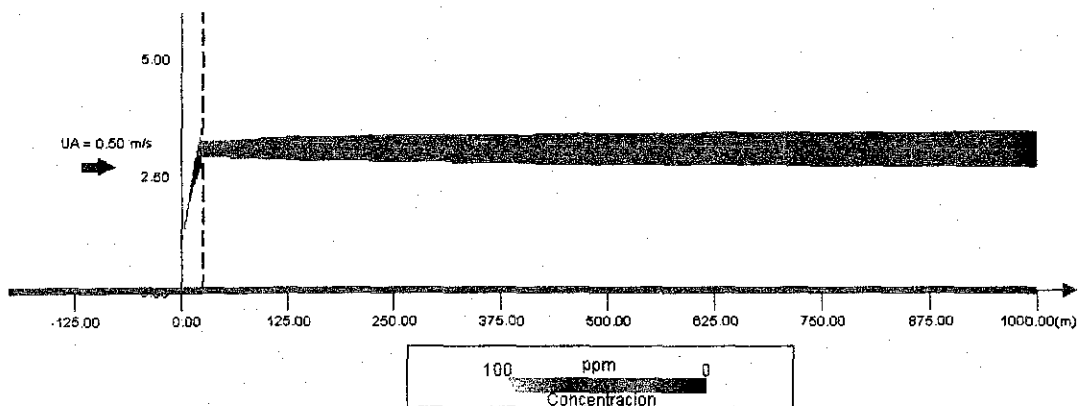


Figura 5.21 Comportamiento en perfil para múltiples puertos y ambiente estratificado

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

El comportamiento de la densidad se indica en la Figura 5.22, para la profundidad donde se presenta el nivel de atrapamiento, la densidad, predicha por ambos modelos es casi igual a la densidad ambiental a esa profundidad.

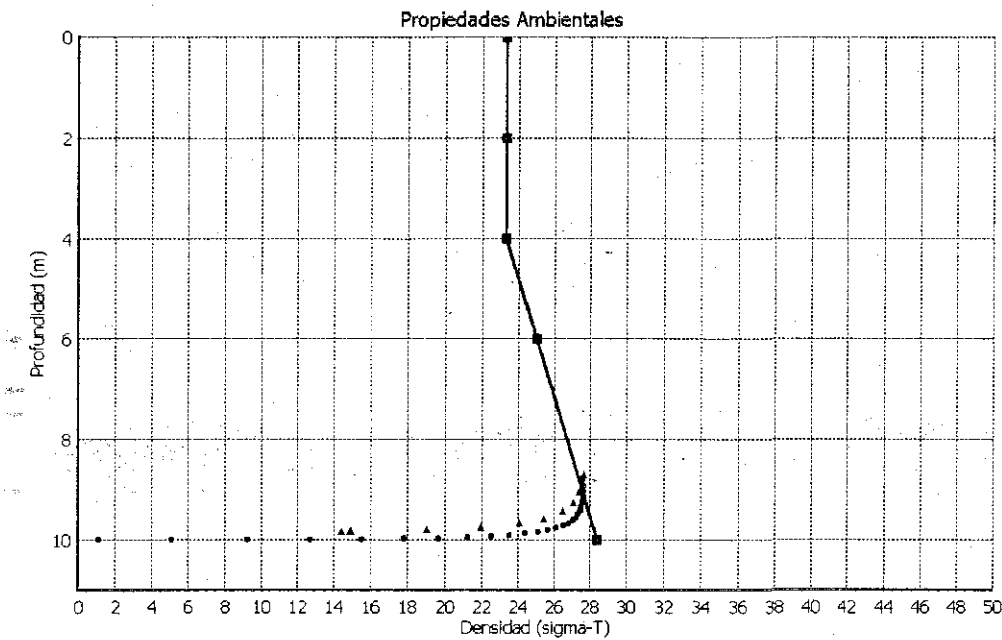


Figura 5.22. Densidad vs. profundidad para una descarga de 10 puertos no estratificada

La dilución obtenida con una descarga a través de múltiples puertos en un ambiente estratificado, al igual que en la Figura 5.12, es menor que para una descarga con las mismas características pero en una columna de agua no estratificada.

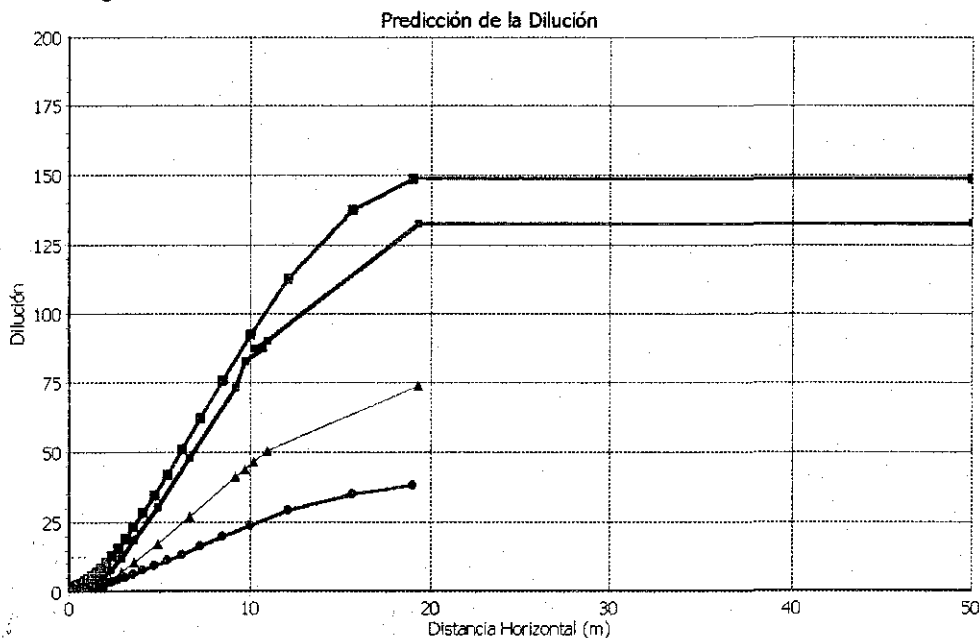


Figura 5.23. Dilución vs. distancia horizontal para una descarga de 10 puertos estratificada

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

La dilución obtenida por CORMIX se indica en la Figura 5.24 , se observa que es menor a la predicha cuando el ambiente no esta estratificado, a los 10 metros se tiene una dilución de 39.1 y a los 50 metros una de 140.

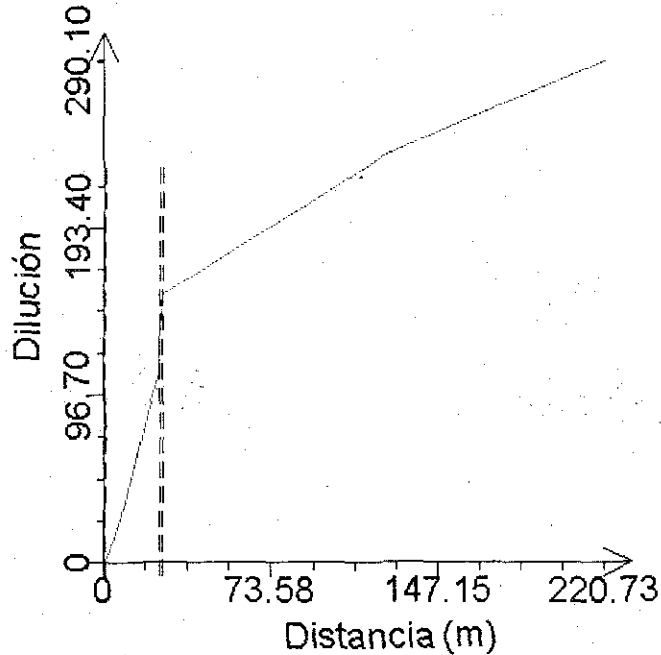


Figura 5.24 Dilución para ambiente estratificado con múltiples puertos

5.4 Caso real

El diseño de un emisor submarino no se debe realizar para un solo escenario, ya que de hacerse de esta manera no se tiene la certeza de que este sea el caso más desfavorable y aún si lo fuera, la modelación de los contaminantes varía en el tiempo y no necesariamente se presenta la menor dilución de un contaminante cuando el caudal descargado por el difusor es máximo

A continuación se presenta la modelación de un difusor para un periodo de 24 horas, considerando diversas variaciones en el caudal descargado,.

5.4.1 Descripción del proyecto

5.4.1.1 Población

Según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática (59), las siguientes son las poblaciones para los censos de población y vivienda de 1990, 1995 y 2000 (Tabla 5.5)

Año	Población
1990	328.607
1995	425.073
2000	457.377

Tabla 5.5 Poblaciones para la Ciudad de Veracruz, INEGI



La tasa de crecimiento se calcula con la expresión (5.1)

$$Tasa = \left[\left(\frac{hab_{año2}}{hab_{año1}} \right)^{\frac{1}{(año2-año1)}} - 1 \right] \times 100 \quad (5.1)$$

Lo cual genera las siguientes tasas de crecimiento para cada periodo

Periodo	Tasa (%)
1990-1995	5.283
1995-2000	1.476

Tabla 5.6 Tasas de crecimiento para la ciudad de Veracruz

El periodo de diseño para la planta de tratamiento, y por consiguiente el emisor submarino es de 10 años

Para calcular la población para el año 2012 se utiliza la expresión

$$Hab_{AñoX} = (Tasa + 1)^{(AñoX - 2000)} \times Hab_{2000} \quad (5.2)$$

Se escoge la tasa de crecimiento de 1.476%, ya que existe una tendencia a estabilizarse el crecimiento, la población de diseño es por lo tanto de 545.281 habitantes

El puerto de Veracruz, ubicado en el Golfo de México en el estado que lleva el mismo nombre, la población predicha para el año 2002 es de 470.976 personas, la cual tiene una dotación de 350 lts/hab*día, la planta de tratamiento está diseñada para dar tratamiento primario, el cual corresponde a remoción de todos los sólidos del 65%, el contaminante no conservativo que se modela es la demanda bioquímica de oxígeno

5.4.1.2 Variación en el caudal descargado

En el volumen diario de agua residual entregado a la red de alcantarillado, la mayoría de los autores e investigadores están de acuerdo en que la aportación es un porcentaje del valor de la dotación, ya que existe un volumen del líquido que no tributa a la red de alcantarillado, como es el utilizado para el consumo humano, riego de jardines, lavado de coches, etc.

Considerando lo anterior, se adopta como aportación de aguas negras el 75% de la dotación de agua potable.

5.4.1.2.1 Gastos de diseño

Los gastos que se consideran en los proyectos de alcantarillado y por consiguiente en el diseño del emisor son: el gasto medio, mínimo, máximo instantáneo y máximo extraordinario, los tres últimos dependen del primero.

5.4.1.2.2 Gasto medio

Es el valor del caudal de aguas residuales en un día de aportación promedio al año, se calcula con la expresión (5.3), donde A_p , es la aportación de aguas negras en l/hab*día, P es la población, en número de habitantes.

$$Q_M = \frac{A_p P}{86400} \quad (5.3)$$

por tanto el caudal medio es, 1.6567 m³/s.

5.4.1.2.3 Gasto mínimo

El gasto mínimo es el menor de los valores de escurrimiento que normalmente se presenta en un conducto, se acepta que este valor es igual a la mitad del gasto medio, CNA 1994

$$Q_{\min} = 0.5 \times Q_M \quad (5.4)$$

El gasto mínimo es equivalente a 0.8383 m³/s.

5.4.1.2.4 Gasto máximo instantáneo

Este gasto es el valor máximo que se puede presentar en un momento dado, este gasto se obtiene a partir del coeficiente de Harmon, expresión UIT

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}} \quad (5.5)$$

Donde P es la población servida acumulada en miles de habitantes, este coeficiente de variación máxima instantánea se aplica considerando que:

- Si la población es menor a 1000 habitantes, el coeficiente adquiere un valor de 3.8
- Si la población servida es mayor a 63.454, el coeficiente M se puede considerar constante e igual a 2.17, es decir, se acepta que su valor a partir de esta cantidad de habitantes, sigue la ley de variación de Harmon

Lo anterior resulta de considerar al alcantarillado como un reflejo de la red de distribución de agua potable, ya que el coeficiente M se equipará con el coeficiente de variación del gasto máximo horario necesario en un sistema de agua potable, cuyo límite inferior es de $1.40 \times 1.55 = 2.17$

La expresión para el cálculo del gasto máximo instantáneo es:

$$Q_{MI} = M \times Q_M \quad (5.6)$$

El gasto máximo instantáneo, es 3.595 m³/s.

5.4.1.2.5 Gasto máximo extraordinario

Es el caudal de aguas residuales que considera aportaciones de agua que no forman parte de las descargas normales, como por ejemplo, bajadas de aguas pluviales de azoteas, patios o las provocadas por un crecimiento demográfico explosivo no considerado.

En función de este gasto se determina el diámetro adecuado del difusor, ya que brinda un margen de seguridad para prever los excesos de las aportaciones que pueda recibir la planta de tratamiento bajo esas circunstancias.

En los casos en que se diseñe un sistema nuevo apegado a un plan de desarrollo urbano que impida el crecimiento desordenado y se prevea que no existan aportaciones pluviales, el coeficiente de seguridad será 1.0

En los casos en que se diseñe considerando que la planta de tratamiento será alimentada por un alcantarillado combinado (aguas residuales y pluviales), el coeficiente de seguridad será de 1.5.

La expresión para el cálculo del gasto máximo extraordinario es:

$$Q_{ME} = CS \times Q_M \tag{5.7}$$

para este diseño, se considera que el crecimiento de la población es controlado y que el sistema de alcantarillado es solo para aguas residuales, por lo tanto el coeficiente de seguridad es 1.0 y el caudal máximo extraordinario es 3.595 m³/s.

5.4.1.2.6 Ley de variación horaria

La ley de variación horaria promedio para diferentes ciudades de la República Mexicana se muestra en la Tabla 5.7. Para este caso, se asume que la variación en la demanda sea la misma que la descarga para el emisor.

t (h)	Q/Q _m	t (h)	Q/Q _m
0:00	0.606	12:00	1.288
1:00	0.616	13:00	1.266
2:00	0.633	14:00	1.216
3:00	0.637	15:00	1.201
4:00	0.651	16:00	1.196
5:00	0.828	17:00	1.151
6:00	0.938	18:00	1.121
7:00	1.199	19:00	1.056
8:00	1.307	20:00	0.901
9:00	1.372	21:00	0.784
10:00	1.343	22:00	0.710
11:00	1.329	23:00	0.651

Tabla 5.7. Variación horaria del caudal

El diseño del emisor se realizará con el caudal medio, afectado este por la ley de variación horaria, se revisará el diseño para los gastos mínimo y máximo extraordinario



5.4.1.3 Variación en la densidad del agua

Se realizan 2 modelaciones, una para los meses de correspondientes al invierno y otra para los meses del verano. En la primera modelación se considera una temperatura de 23 C, y una salinidad promedio de 35.8 ups, lo cual según la figura 2.12 conlleva a una densidad uniforme de 1024.3 kg/m3, mientras que en el verano se considera una estratificación, ver Tabla 5.8.

Profundidad (m)	Temperatura (C)	Salinidad (ups)	Densidad (kg/m3)
0	29	35.8	1023.1
10	28	35.7	1023.3
20	26	35.6	1023.8
40	24	35.5	1024.2

Tabla 5.8 Variación de la densidad para el verano

La densidad del efluente se considera constante durante todo el año y es igual a 1000 kg/m3.

5.4.1.4 Oleaje

Para el puerto de Veracruz, según WWA 2002, se presenta el siguiente oleaje.

Estación	Altura de Ola (m)	Periodo (s)	Dirección
Primavera	1.02	6.6	NE
Verano	0.85	6.6	NE
Otoño	1.67	7.0	N
Invierno	1.34	7.0	N

Tabla 5.9 Oleaje para el puerto de Veracruz

El perfil de velocidades, para el invierno y el verano se indican en las Figura 5.25 y Figura 5.26, respectivamente.

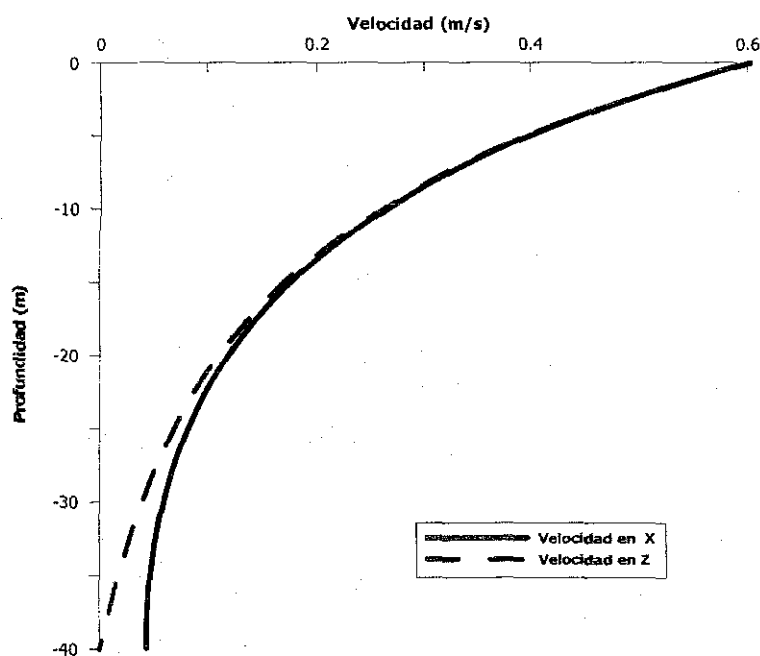


Figura 5.25 Perfil de Velocidades para el invierno

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

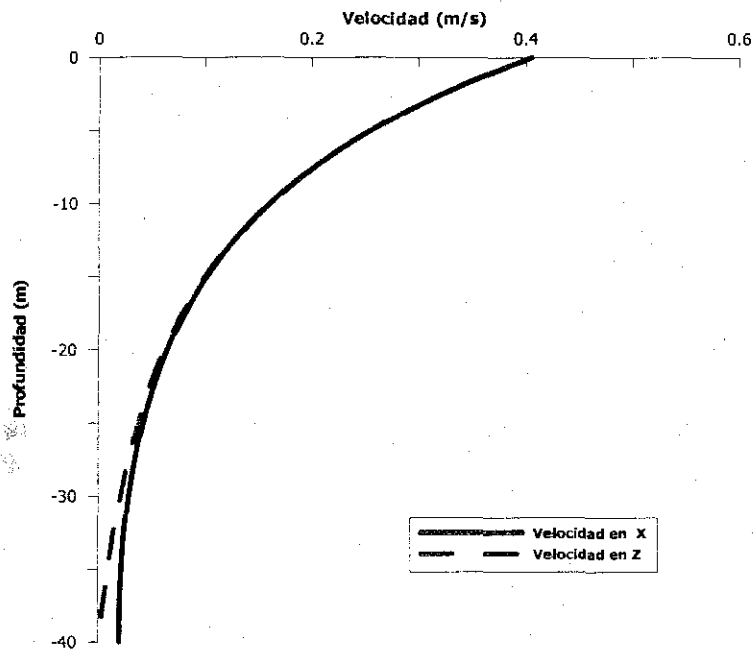


Figura 5.26 Perfil de velocidades para el verano

5.4.1.5 Fuerzas

Considerando un valor de 1.5, 2.0 y 1.5 para los coeficientes de arrastre, sustentación e inercia, respectivamente, las fuerzas que actúan sobre la tubería, calculadas en la parte superior de la tubería, se muestran en las Figura 5.27 y Figura 5.28 para el invierno y el verano, respectivamente.

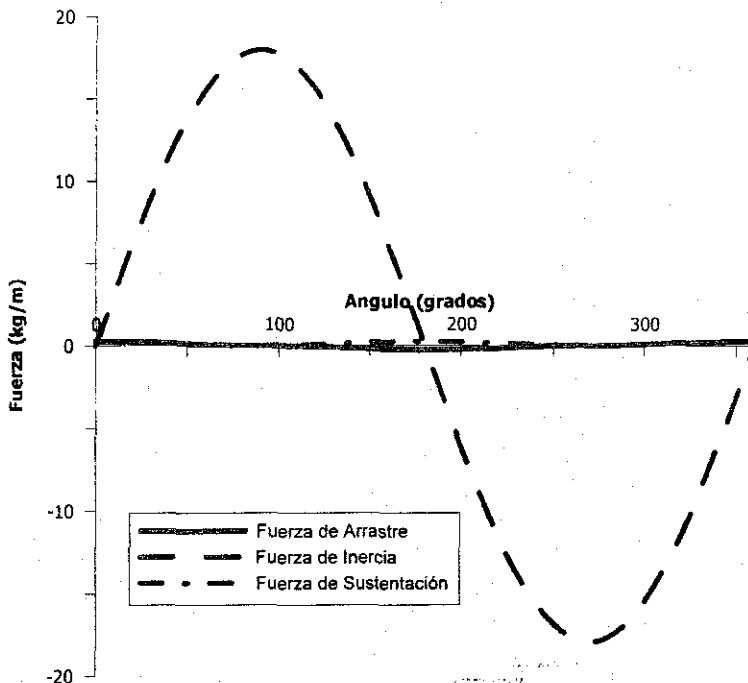


Figura 5.27 Fuerzas actuantes sobre la tubería en el invierno

TESIS CON
VALIA DE ORIGEN

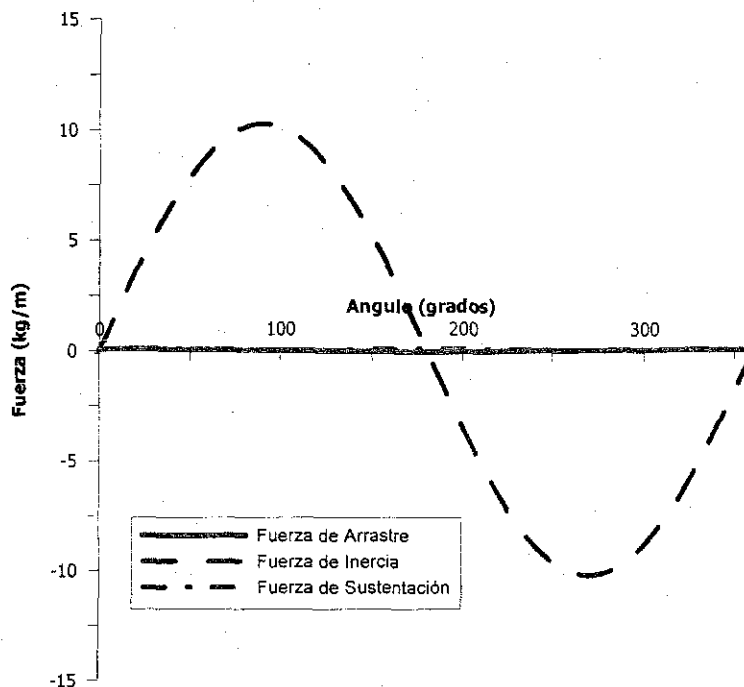


Figura 5.28 Fuerzas actuantes sobre la tubería en el verano

5.4.1.6 Definición de zonas

De acuerdo con el apartado 2.2 del capítulo 1, se definen las zonas de dilución inicial y de mezclado, para la primera se utiliza un radio de 50 metros desde los puertos, mientras que para la segunda se utiliza un radio de 100 metros. La concentración crónica es de 1 ppm, y la concentración máxima permitida es de 5 ppm para la demanda bioquímica de oxígeno, los valores de los parámetros deben ser siempre inferiores a los de la tabla 1.4

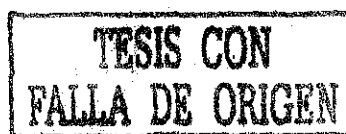
5.4.1.7 Cálculo hidráulico para el difusor y los puertos.

El cálculo hidráulico se realiza con la ayuda del programa PLUMEHYD, el cual fue realizado por la EPA y se incluye en el programa predecesor al Visual Plumes, DOS PLUMES, Lorin(1999)

Los datos necesarios para ejecutar este programa se indican en la Tabla 5.10

Dato	Valor
Número total de puertos	150
Número de secciones del difusor	1
Relación de densidades	0.025
Forma geométrica de la salida de los puertos	Afilada
Diámetro de las secciones del difusor (m)	0.762
Distancia entre puertos (m)	2
Pendiente del difusor	1:40
Diámetro de los puertos (m)	0.0508
Coefficiente de Manning	0.013
Caudal total transportado (m ³ /s)	1.657

Tabla 5.10 Datos de diseño para el emisor submarino



En la Figura 5.29 se presenta en función del número de Froude densimétrico para cada puerto el comportamiento cuando se transporta el caudal medio o el caudal mínimo. Los números de Froude densimétricos obtenidos, con cualquiera de los dos caudales, son adecuados para el diseño. El valor mínimo recomendado es de 3, se éste valor es mayor entonces las diluciones requeridas se alcanzarán a una distancia menor.

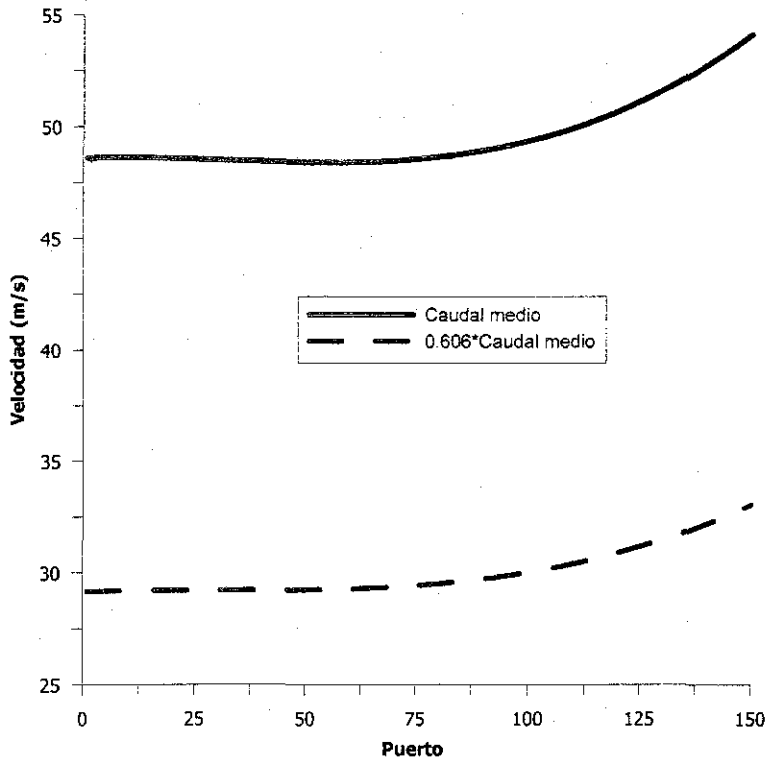


Figura 5.29 No Froude densimétrico vs Puerto para el difusor de Veracruz

La Figura 5.30 presenta la velocidad dentro de la tubería entre cada puerto, se observa que la velocidad tiene su máximo en el puerto número 150 y a partir de este empieza a disminuir hasta el valor mínimo en el primer puerto. En esta figura, se presentan las graficas para el caudal medio y el caudal mínimo y en ambos casos los valores obtenidos son aceptables para el diseño, ya que solo unos pocos están por debajo del límite recomendado de 0.6m/s lo cual no justifica disminuir el diámetro del difusor para tan pocos puertos

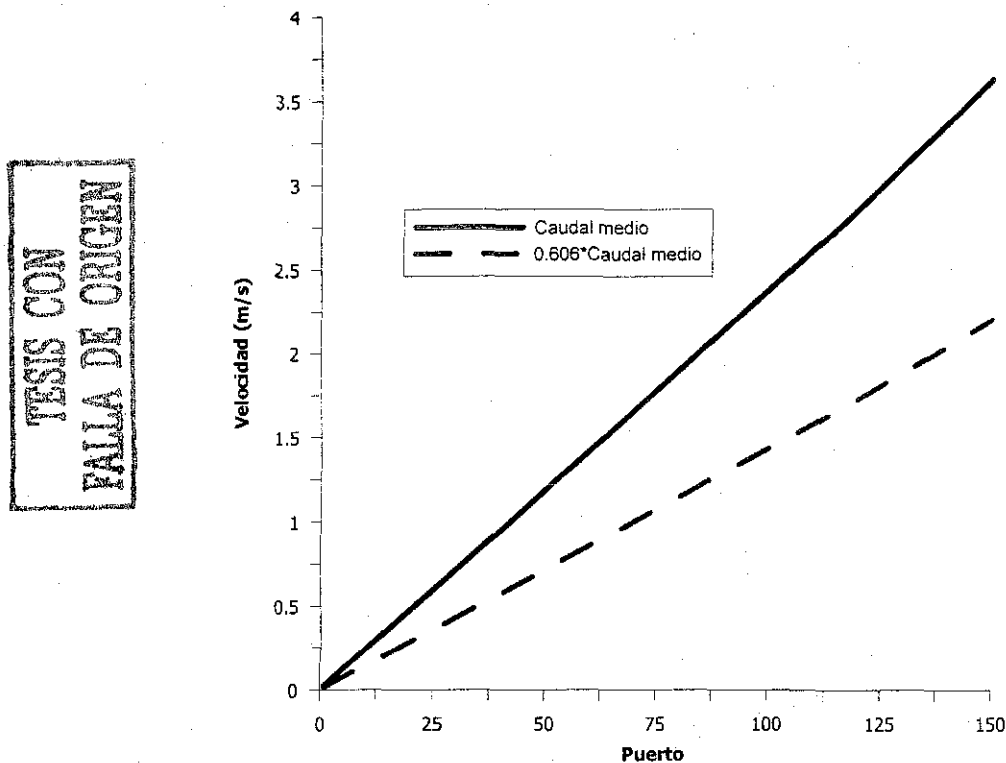
5.4.1.8 Planta de tratamiento

Al inicio del difusor se construye una planta de tratamiento de aguas residuales de nivel primario, la cual tiene las características descritas en la figura 1.5, las características del agua residual se encuentran en la Tabla 1.6

El agua residual que sale por los difusores tiene las siguientes características

Parámetro	Valor
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	244
Sólidos totales (mg/L)	1191
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	6×10^8

Tabla 5.11 Características del agua residual a través de los puertos



TESIS CON
 NO SESI
 FALTA DE ORIGEN

Figura 5.30 Velocidad entre puertos vs Puerto para el difusor de Veracruz

5.4.1.9 Geometría del difusor

El difusor tiene una longitud de 1600 metros y los puertos se localizan en los últimos 300 metros. La profundidad a la que se realiza la descarga es de 40 metros y los puertos están a 1 metro sobre la superficie. Las tuberías se colocan directamente sobre el fondo de mar, se protegen con una capa de roca, el método de construcción se esquematiza en la Figura 5.31

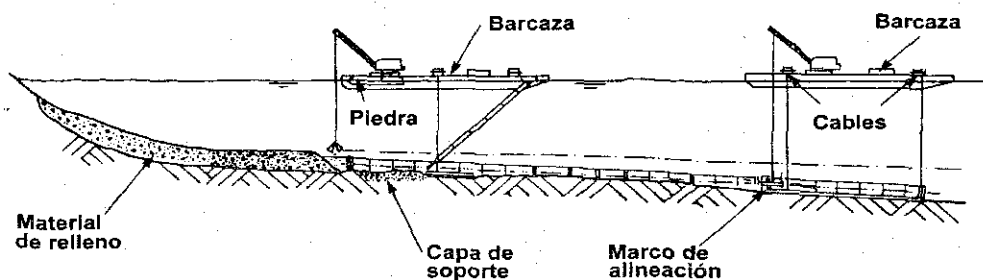


Figura 5.31 Método de colocación para la tubería

5.4.1.10 Datos varios

El coeficiente de decaimiento, para las sustancias no conservativas, considerando un coeficiente de extinción de 0.16/m, una temperatura de 29 C, una radiación solar de 120 ly/hr (de la Lanza, 2001),

una profundidad de 40 m, un porcentaje de agua salada del 100%, según la ecuación (4.8) es $21.29d^{-1}$

5.4.2 Modelación para el invierno

En este caso, se realiza la modelación para el invierno, los programas utilizados son Visual Plumes, con sus modelos UM3, DKHW y NRFIELD, los cuales son del tipo lagrangiano, euleriano y empírico, y el programa CORMIX. Al final de la modelación se presentan las gráficas para el comportamiento en perfil de cada pluma, así como para las diluciones alcanzadas.

5.4.2.1 Modelo UM3

La Tabla 5.12, presenta la dilución que se obtiene con el Modelo UM3 a una distancia de 100 metros del difusor

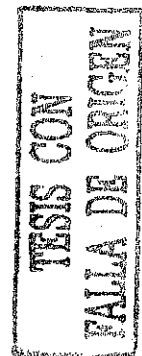
Caudal (m ³ /s)	Dilución (S)	Caudal (m ³ /s)	Dilución (S)
1.004	1225.3	2.097	641.7
1.021	1201.3	2.015	671.5
1.049	1175.9	1.990	673.4
1.055	1175.1	1.981	674.1
1.078	1150.7	1.907	692.3
1.372	922.0	1.857	709.2
1.554	836.5	1.749	745.1
1.986	673.7	1.493	858.8
2.165	625.6	1.299	965.8
2.273	607.5	1.176	1056.4
2.275	607.4	1.078	1150.7
2.202	623.1	0.838	1435.4
2.134	639.1	3.595	415.6

Tabla 5.12 Dilución para la zona de mezclado en invierno con el modelo UM3

5.4.2.2 Modelo DKHW

La Tabla 5.13, presenta la dilución que se obtiene con el modelo DKHG a una distancia de 100 metros del difusor

Caudal (m ³ /s)	Dilución (S)	Caudal (m ³ /s)	Dilución (S)
1.004	1639.5	2.097	1072.5
1.021	1621.3	2.015	1100.3
1.049	1592.5	1.990	1109.2
1.055	1586.5	1.981	1112.2
1.078	1564.0	1.907	1078.6
1.372	1334.1	1.857	1095.4
1.554	1229.0	1.749	1138.7
1.986	1110.6	1.493	1262.2
2.165	1050.8	1.299	1382.9



2.273	1018.7	1.176	1476.6
2.275	1018.1	1.078	1564.0
2.202	1039.5	0.838	1848.9
2.134	1060.6	3.595	765.9

Tabla 5.13 Dilución para la zona de mezclado con el modelo DKHG

5.4.2.3 CORMIX

El comportamiento en perfil de la pluma se muestra en la Figura 5.32. Se observa que ésta cubre toda la columna de agua, el comportamiento es similar al predicho por los modelos UM3 y DKHG.

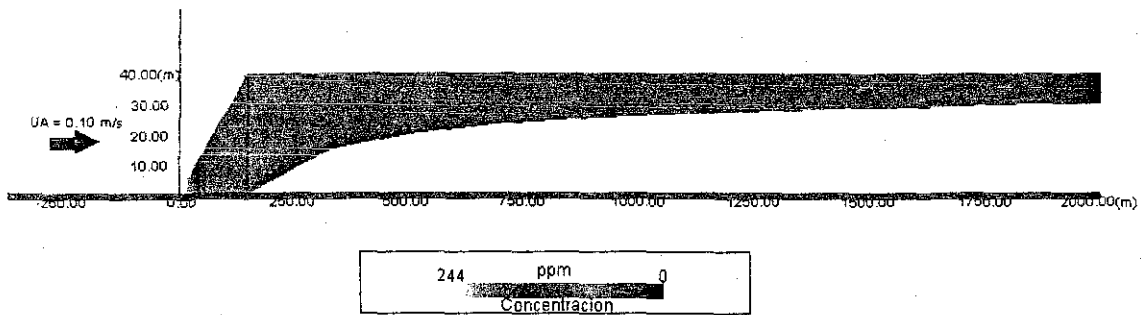


Figura 5.32 Comportamiento en perfil para la pluma en el invierno

La Tabla 5.14 presenta la dilución a 100 metros del difusor que se obtiene al aplicar CORMIX, se observa que entre más alto sea el caudal la dilución es menor, ya que la cantidad de agua que se está depositando es mayor y por lo tanto es más difícil diluirla.

Caudal (m ³ /s)	Dilución (S)	Caudal (m ³ /s)	Dilución (S)
1.004	996.9	2.097	482.9
1.021	980.4	2.015	501.9
1.049	954.5	1.990	508.1
1.055	949.9	1.981	510.3
1.078	929.0	1.907	529.6
1.372	731.7	1.857	543.5
1.554	647.2	1.749	576.3
1.986	509.1	1.493	673.2
2.165	468.1	1.299	772.3
2.273	446.6	1.176	852.2
2.275	446.6	1.078	929.0
2.202	460.5	0.838	1193.1
2.134	474.7	3.595	289.4

Tabla 5.14 Dilución a 100 metros con CORMIX

En la Figura 5.33 se representan los resultados obtenidos con cada modelo, se observa que entre mayor sea la descarga, menor es la dilución.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

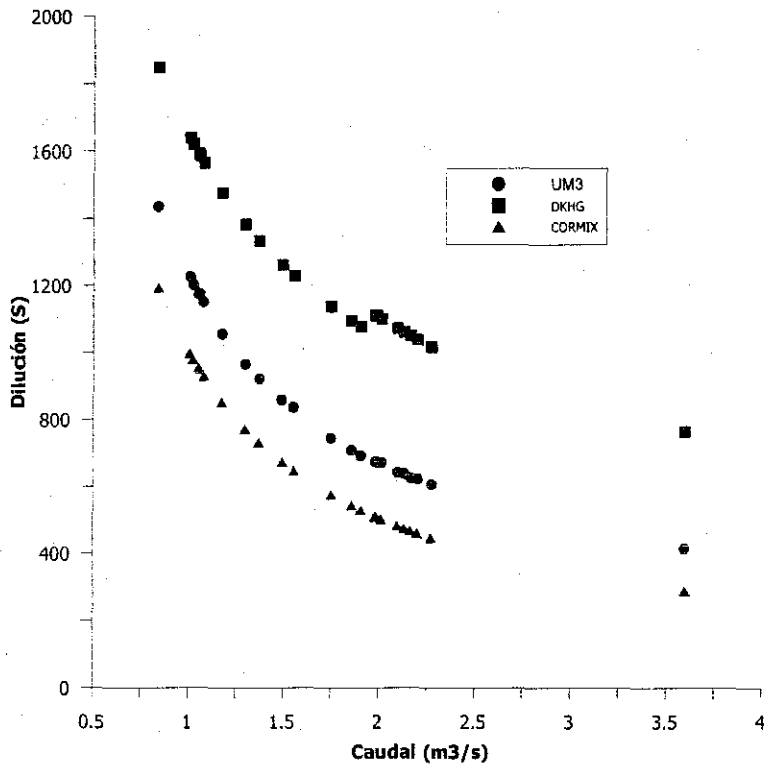


Figura 5.33 Variación de la dilución en función del caudal durante el invierno

5.4.3 Modelación para el verano

5.4.3.1 Modelo UM3

La Tabla 5.15 presenta la modelación para el verano, se indica la dilución a la misma distancia que las tablas anteriores (100 metros) y la profundidad a la cual se ha estabilizado la pluma, la cual siempre se da antes de los 100 metros

Caudal (m ³ /s)	X (m)	Dilución (S)	Profundidad de Atrapamiento (m)
1.004	100	636.5	28.10
1.021	100	628.2	28.00
1.049	100	614.1	27.95
1.055	100	611.2	27.91
1.078	100	600.3	27.89
1.372	100	532.1	26.98
1.554	100	498.9	26.45
1.986	100	439.3	25.53
2.165	100	417.8	25.25
2.273	100	410.5	25.07
2.275	100	410.3	25.06
2.202	100	411.3	25.27
2.134	100	423.4	25.34

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

2.097	100	418.6	25.45
2.015	100	433.7	25.57
1.990	100	438.6	25.52
1.981	100	440.1	25.55
1.907	100	443.0	25.79
1.857	100	453.5	25.83
1.749	100	464.3	26.08
1.493	100	501.9	26.70
1.299	100	546.2	27.20
1.176	100	575.9	27.48
1.078	100	600.3	27.89
0.838	100	700.4	28.76
3.595	100	331.9	23.46

Tabla 5.15 Dilución en verano con el modelo UM3

5.4.3.2 Modelo DKHW

La Tabla 5.16 presenta al modelación para el verano, se observa que las diluciones son mucho más altas que las indicadas en la tabla anterior.

Caudal (m ³ /s)	X (m)	Dilución (S)	Profundidad de Atrapamiento (m)
1.004	100	519.5	30.65
1.021	100	513.9	30.61
1.049	100	505.1	30.43
1.055	100	503.1	30.41
1.078	100	496.3	30.36
1.372	100	428.3	29.54
1.554	100	398.7	29.10
1.986	100	349.4	28.28
2.165	100	334.6	27.96
2.273	100	326.8	27.83
2.275	100	326.6	27.83
2.202	100	331.9	27.91
2.134	100	337.0	28.00
2.097	100	340.0	28.04
2.015	100	346.9	28.15
1.990	100	349.1	28.28
1.981	100	349.8	28.29
1.907	100	356.8	28.39
1.857	100	361.8	28.46
1.749	100	373.5	28.71
1.493	100	407.8	29.33
1.299	100	442.4	29.76

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

1.176	100	470.0	30.08
1.078	100	496.3	30.36
0.838	100	585.6	31.21
3.595	100	253.8	26.85

Tabla 5.16 Dilución para el verano con el modelo DKHW

5.4.3.3 CORMIX

El comportamiento en perfil de la pluma se indica en la Figura 5.34, se observa que esta cubre toda la columna de agua, este comportamiento es similar al predicho por los modelos UM3 y DKHW

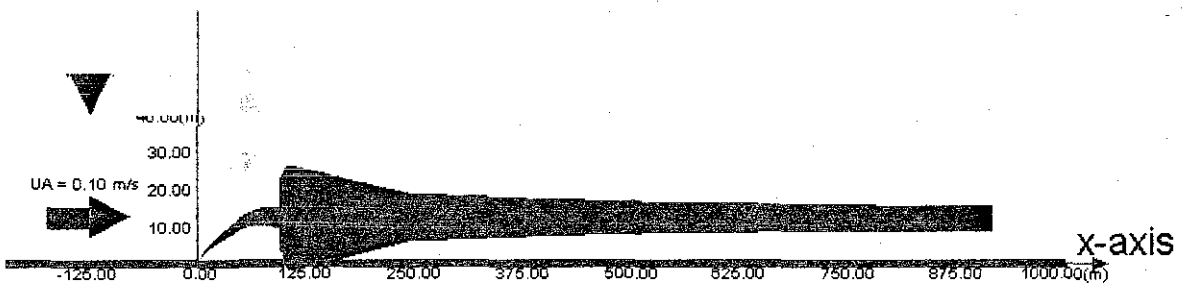


Figura 5.34 Comportamiento en perfil para la pluma en el verano

En la Tabla 5.17 se indican las diluciones alcanzadas a 100 metros, lo mismo que la profundidad de atrapamiento según CORMIX

Caudal (m ³ /s)	X (m)	Dilución (S)	Profundidad de Atrapamiento (m)
1.004	100	504.00	31.66
1.021	100	499.15	31.62
1.049	100	491.51	31.55
1.055	100	489.93	31.54
1.078	100	483.87	31.48
1.372	100	417.82	30.85
1.554	100	384.71	30.52
1.986	100	321.34	29.85
2.165	100	299.58	29.61
2.273	100	287.49	29.47
2.275	100	287.12	29.47
2.202	100	295.37	29.56
2.134	100	303.25	29.65
2.097	100	307.66	29.70
2.015	100	317.75	29.81
1.990	100	320.88	29.84
1.981	100	322.06	29.86
1.907	100	331.73	29.96
1.857	100	338.52	30.03

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1.749	100	353.99	30.20
1.493	100	395.24	30.63
1.299	100	432.48	31.00
1.176	100	459.68	31.26
1.078	100	483.87	31.48
0.838	100	561.06	32.11
3.595	100	200.91	28.15

Tabla 5.17 Dilución para el verano con CORMIX

En la Figura 5.35 se presenta la dilución máxima alcanzada a 100 metros del difusor para cada modelo, dejando constante todos los parámetros y variando el caudal, se observa que para descargas mayores la dilución es menor, todas las curvas tienen la misma forma, con un máximo de dilución para un caudal menor y una tendencia a estabilizar la dilución mientras el caudal aumenta, se llega a una dilución máxima que permite el medio receptor, para cualquier caudal descargado. Se observa que para 100 metros, la dilución es mucho mayor a la permitida la cual es de 1ppm, en este caso el diseño del difusor cumple con el propósito de garantizar una concentración máxima en el lugar donde termina la zona de mezclado.

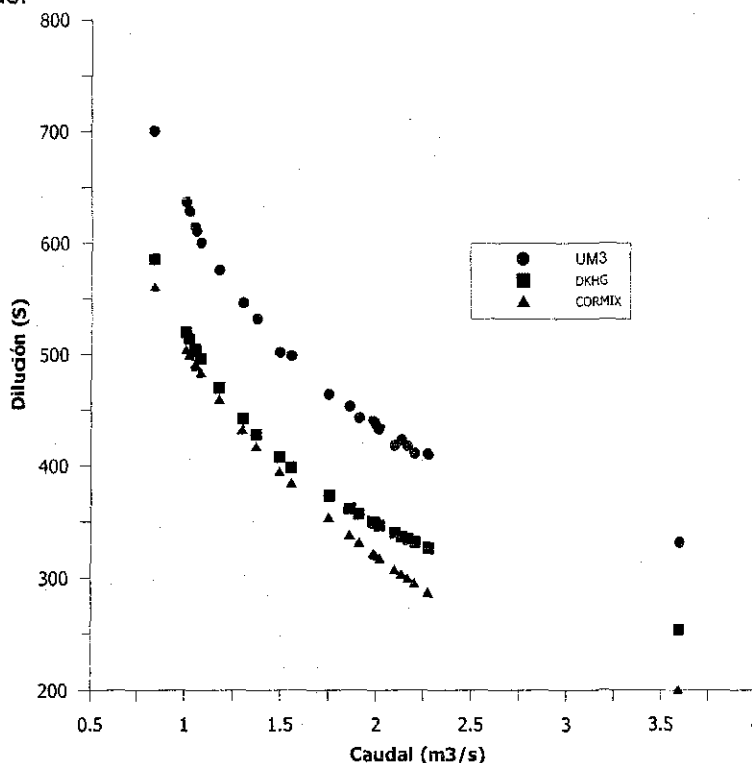


Figura 5.35 Variación de la dilución en función del caudal durante el verano.

La Figura 5.36 muestra el nivel de atrapamiento para diferentes caudales, las predicciones para el nivel de atrapamiento son mucho más cercanas entre modelos que cuando se predice la dilución, se observa que el nivel al que la pluma se estabiliza no depende casi del caudal descargado sino de las condiciones ambientales del lugar de descarga.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

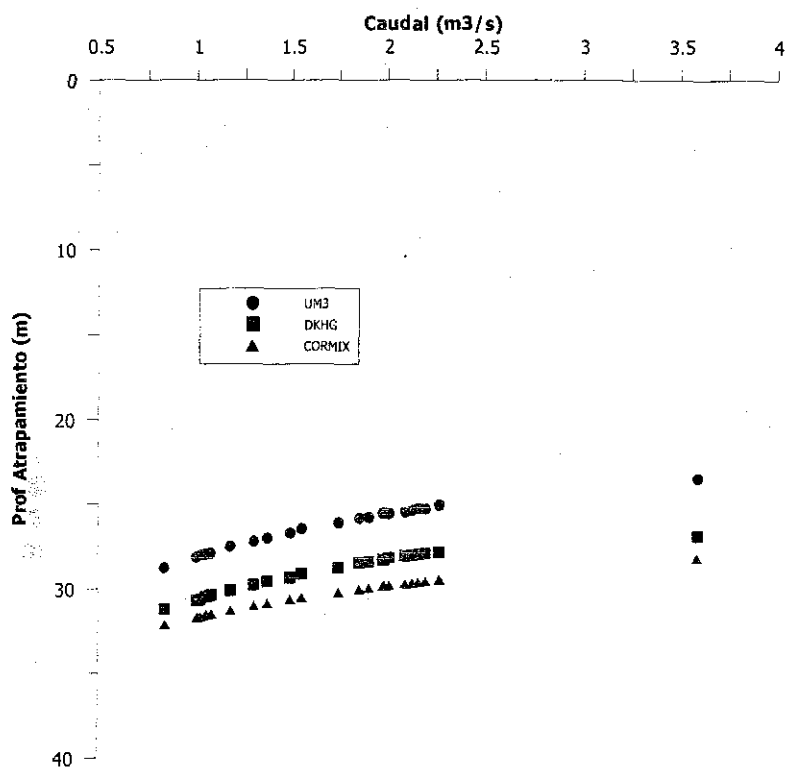


Figura 5.36 Variación del nivel de atrapamiento en función del caudal durante el verano

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VOS ZERT
WED. 10.11.1966

12/14/6

CONCLUSIONES y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes a las que se llegó al realizar este trabajo, son las siguientes:

La utilización de un emisor submarino, como alternativa para la disposición final del agua residual en el océano, es una opción válida que debe considerarse para lograr cumplir los cada vez más estrictos requerimientos de calidad del agua

Un difusor submarino es un componente de un sistema de saneamiento litoral integral y no un elemento aislado, ya que de ser así el funcionamiento del sistema será de manera defectuosa

Es necesario construir una planta de tratamiento, al menos con tratamiento primario, para el correcto funcionamiento hidráulico del difusor submarino.

La dilución inicial es el parámetro más importante en la dilución total, por lo cual se debe tratar de que la velocidad de descarga a través de los puertos sea lo mas alta posible.

Los emisores con múltiples puertos son más efectivos que los emisores con un solo puerto de descarga para alcanzar grandes diluciones en distancias cortas.

Al momento de aplicar un modelo en específico para conocer el comportamiento de las plumas de un difusor se debe tener en cuenta que las condiciones de operación del emisor sean similares a las condiciones para las que se obtuvo el modelo, además que los datos básicos que se introduzcan en el modelo sean obtenidos a partir de campañas de campo o de estudios realizados adecuadamente. Es necesario hacer mucho énfasis en los modelos utilizados, ya que si los modelos que se deciden utilizar no son los adecuados, los resultados obtenidos no representaran en ningún caso la realidad.

Si las condiciones de operación del emisor no están representadas adecuadamente, por ningún modelo adecuadamente, se debe considerar la posibilidad de realizar un modelo físico para comprender mejor el comportamiento de la pluma

La determinación correcta de los parámetros de oleaje (altura de ola y periodo) al igual que la temperatura y salinidad del mar, son imprescindibles para el diseño correcto del emisor. Por mas apropiado que sea el modelo utilizado, si estos parámetros están determinados de manera errónea los resultados obtenidos estarán lejos de los verdaderos.

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Con la realización de esta tesis, se proponen varias líneas de investigación, como las siguientes

Realizar un modelo numérico propio que permita conocer las características geométricas de la pluma al igual que las concentraciones de los contaminantes alcanzadas a diferentes distancias del difusor.

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación

Construir un modelo físico en un canal de oleaje espectral que permita obtener datos para calibrar el modelo anterior, al igual que realizar comparaciones con los modelos actuales.

Realizar un programa de cálculo que permita calcular exactamente la distribución del flujo a través de un difusor con múltiples puertos en forma de T, y además considerar las pérdidas producidas por las válvulas de no retorno que se utilizan en la actualidad.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Abramowitz M., Stegun, L.E., **"Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables"**, U.S Department Of Commerce, National Bureau Of Standards, Applied Mathematics Series. 55, 1972, 10 Ed.

Aguilar, M.B., **"Diseño Hidrodinámico de Líneas Marinas de Conducción De Hidrocarburos"**, Tesis de Licenciatura Ingeniería Petrolera, Universidad Nacional Autónoma De México 1999.

Akar, P.J., Jirka, G.H., , **"Cormix2: an expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged multipoint discharges"**, U.S. Epa. Environmental Research Laboratory, Athens , Ga, Epa-600/3-91/073. 1991.

Akyarli, A., Arisoy, Y., **"The concept or the optimum alignment of discharge pipelines due to the minimization of the wave forces"**, Pag 211-216, Marine Disposal Systems, Water Science And Technology, Vol. 25, No 9, 1992.

Bai, Y., **"Pipelines and risers"**, Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 3, Series Editors R. Bhattacharyya & M.E. McCormick, 2001.

Baumgartner, B.J., Frick, W.E., Roberts, P.J.W., **"Dilution models for effluent discharges Third Edition"**, U.S. Environmental Protection Agency, March 22, 1994.

Bazzurro, N., **"Aquarius-aqua receiving information from underwater sensors"**, Life99 Project N. En/It/000155.

Bazzurro, N., **"Sea waste water outfalls along the mediterranean costs an on line monitoring: the aquarius project of the eu/life environment programme"**, Génova 12-14 October 2000

Britto, E.R., Almeida, S.A.A., Goncalves, F.B., **"An example of how bad public relations can defeat a good water pollution control project"**, Pag 261-267, Marine Disposal Systems, Water Science And Technology, Vol. 25, No 9, 1992.

Brooks, N.H., **"Diffusion of sewage effluent in an ocean Current"**, Waste Disposal In The Marine Environment, Editorial Pearson 246-267, Pergamon Press, New York, 1959

Burrows, R., Neves, M.J.V., **"European attitude to the disposal of wastewater in the sea: the case for an european network for sea outfall research"**, Water Science Technology, Vol. 38, No 10, Pp 317-321, 1998.

Celestino da Costa, P., **"The reintegration of used waters in the environment"**, Pag 269-275, Marine disposal systems, water science and technology, Vol. 25, No 9, 1992.

Comisión Nacional del Agua, "**Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario**", Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Octubre 1994.

Council of European Communities. **Directive 76/160/EEC concerning the quality of bathing water**. Official Journal of the European Communities No L54. 1976b.

Council of European Communities. **Directive 79/323/EEC on the quality required of shelfish waters**. Official Journal of the European Communities No L281/4. 1979.

Dean, R., Dalrymple, R., "**Water wave mechanics for engineers and scientific**", Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 2, World Scientific, 1984.

Dean, R.G., Perlin, M., "**Intercomparison of near-bottom kinematics by several wave theories and field an laboratory data**" Coastal engineering Vol. 9, 1986.

de la Lanza., G., "**Características físico-químicas de los mares en México**", Temas selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía UNAM, Pág. 149, 2001.

Dickson, T.R., "**Química, Enfoque ecológico**", Editorial Limusa, Sexta reimpresión, Pag 406, 1994.

Doneker, R.L. Jirka, G.H., , "**CORMIX1: an expert system for mixing zone analysis of conventional and toxic single port aquatic discharges**", U.S. EPA. Environmental Research Laboratory, Athens , GA, EPA-600/3-90/012. 1990.

Doneker R.L., Jirka, G.H., "**Expert systems for design and mixing zone analysis of aqueous pollutant discharges**", J. Water Resources Planning and Management , ASCE, Vol. 117, No 6, Pag. 679-697, 1991.

Duer, M.J., "**Use of variable orifice "Duckbill" valves for hydraulic and dilution optimisation of multiport diffusers**", Water Science Technology Vol. 38, No 10 pp 277-284, 1998

Economopoulou, M.A., Economopoulos, A.P., "**Rapid Sizing and Performance Evaluation of Submarine Outfalls with Line Diffusers**", Journal of Environmental Engineering, Vol. 124, No 2, February 1998.

Economopoulou, M.A., Economopoulos, A.P., "**Graphical Sizing and Analysis of Ocean Outfalls with Buoyant Plumes**", Journal of Environmental Engineering, Vol. 127, No 1, January 2001.

Espinal G, J.C., Silva, R., Palacio, A., "**Metodología para el diseño integral de sistemas de saneamiento litoral**", Congreso AMIP, Veracruz, México 2001.

Frick. W.E., Roberts, P.J.W., Davis, L.R., Keyes, J., Baumgartner, B.J., Georges, K.P., "**Dilution models for effluent discharges Fourth edition (Visual Plumes)**" Julio 18, 2001 U.S. Environmental Protection Agency,.

Grace, R.A., "**Marine outfall Systems --Planning, design and construction**", Prentice Hall, New York, 1978.

Govaere, G.A., "**Acción del oleaje sobre estructuras disipativas de simetría radial**", "Tesis de Doctorado", División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2002.

Hirst, E.A., "**Analysis of round turbulent buoyant jets discharged to flowing stratified ambients**", Oak Ridge National Laboratory report ORNL 5685 June 1971

Jiménez, B.E., "**La contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada**", Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA, 2001, 926 p.

Jirka, G.H., Doneker, R.L., "**Hydrodynamic classification of submerged single port discharges**", J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, HY9, Pag. 1095-1112, 1991.

Jirka, G.H., Akar, P.J., Doneker R.L., "**Hydrodynamic classification of submerged multiport port discharges**", J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, HY9, Pag. 1113-1128, 1991.

Jirka, G.H., Doneker R.L., Hinton, S.W., "**User's Manual for CORMIX: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters**", Office of science and technology and technology U.S environmental protection agency Washington, 1996.

Jones, G.R. Nash J.D., Girka, G.H., , "**CORMIX 3: an expert system for mixing zone analysis and prediction of buoyant surface discharges**", Tech. Rep., DeFrees Hydraulics Laboratory, Scholl of Civil and Environmental Engineering, Cornell University. 1996.

Kim, Y.D., Seo, I. W., "**Modeling the mixing of wastewater effluent discharge from ocean outfalls using a hybrid model**", Coastal Engineering Journal, Vol. 43, No 4 (2001) Pag 259-288, World Scientific company and Japan Society of Civil Engineers.

Kirkgoz, M.S., "**Particle velocity prediction of the transformation pint of plunging breakers**". Coastal engineering Vol. 10, 1986.

Lee, R.S., Pritchard, T.R., "**Dispersion of Effluent from Sydney's New Deepwater Outfalls. Part 1: Ocean process**", Costal and Estuarine Studies, Mixing in Estuaries and Costal Seas American Geophysical Union. Pag. 430-438, 1996

Lorin. R., Davis., "**Fundamentals of environmental Discharge Modeling**", CRC Press, Boca Raton, Fl, 1999

Mancini. J.L., "**Numerical estimates of coliform mortality rates under various conditions**", Journal WPCF, Pag 2477-2484, November 1978

Marine Pollution Bulletin, "**Disposal of sewage to the ocean, a sustainable solution?**", VOL. 33, NO 7-12, PP 121-123, 1996

Bibliografía

Moriñigo, M.A., Muñoz, M.A., Cornax, R., Martínez-Manzanares, E., Borrego, J.J.; **"Presence of indicators and Salmonella in natural waters affected by outfall wastewater discharges"**, Pag 1-9, Marine disposal systems, water science and technology, Vol. 25, No 9, 1992.

Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., SAF, S.A., **"The Forces Exerted by Surface Waves on Piles"** Transactions AIME, Vol. 189, 1950.

Muellenhoff, W.P., Schuldt, M.D., Baumgartner, D.J., Soldat, A.M., Davis, L.R., Frick, W.E., **"Initial mixing characteristics of municipal ocean discharges, Procedures and Applications"**, EPA/600/3-85/073a, noviembre 1985.

Página Web del Instituto Nacional de Geografía e informática
<http://www.inegi.gob.mx/estadistica/espanol/sociodem/fsociodemografia.html>

Página Web de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
http://www.semarnat.gob.mx/legislacion_ambiental/reglamentos/contaminacion-mar.shtml

Philip N.A., Pritchard T.R., **"Australia's first deepwater sewage outfalls: Design considerations and environmental performance monitoring"**, Marine Pollution Bulletin, Vol 33, Nos 7-12, pp, 140-146, 1996

Posada, G., Aguilar, M.B., Silva, R., **"Criterios generales para el diseño de tuberías submarinas"**, Congreso AMIP, Veracruz, México 2001.

Pritchard, T.R., Lee, R.S., Davidson, A. **"Dispersion of Effluent from Sydney's New Deepwater Outfalls. Part 2: observations of plume Behaviour: Winter and Summer E**

Prych, E.A., "A warm water effluent analysed as a buoyant surface jets", **Svergis Meteorologiska Och Hydrologiska Institut, Serie Hydrologi N2r 21, Stockholm, 1972.**

Roberts, P.J.W., **"Line Plume and Ocean Outfall Dispersion"**, Journal of the Hydraulics Division, April 1979, ASCE.

Roberts, P.J.W., Snyder W.H., Baumgartner D.J., **"Ocean Outfalls. I: Submerged wastefield formation"**, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 115, No 1, January, 1989.

Roberts, P.J.W., Snyder, W.H., Baumgartner, D.J., **"Ocean Outfalls. II: Spatial evolution of submerged wastefield"**, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 115, No 1, January, 1989.

Roberts, P.J.W., Snyder, W.H., Baumgartner, D.J., **"Ocean Outfalls. III: Effect of diffuser design on submerged wastefield"**, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 115, No 1, January, 1989.

Roberts, P.J.W., **"Outfall design considerations"**, The Sea: Ocean Engineering Science Vol. 9 Part A, Edited by Bernard Le Mahaute. 1990, Pag. 661-689.

Roberts, P.J.W., **"Modeling Mamala bay outfall plumes. I: Near Field"**, Journal of the Hydraulic Engineering, Vol. 125, No 6, Pag 564-573, 1999.

Bibliografía

Roberts, P.J.W., **"Modeling Mamala bay outfall plumes. II: Far Field"**, Journal of the Hydraulic Engineering, Vol. 125, No 6, Pag 574-583, 1999.

Shirazi, M,A, Davis L.R, **"An analysis of buoyant surface jets"**, Transactions of ASME Journal of heat transfer, Vol. 98 Series C, No 3, 367, August 1976.

Shirazi, M.A., Davis L.R., **"Workbook of Thermal plume prediction, Vol II: Surface Discharge"**, EPA. Report, EPA-R2-005a, May 1972b.

Sotelo, G., **"Hidráulica General, Volumen 1 Fundamentos"**, Editorial Limusa, decimosexta impresión, 1995.

Swamee, P.K., Jain, A.K., **"Explicit equations for pipe-flow problems"** Journal of the Hydraulics division, HY5, 657-664, Mayo 1976.

Verley, R. Lund, K.M., **"A Soil Resistance model for pipelines placed on clay Soils"** Proceedings of OMAE, 1995.

Water Research Centre, **"Design guide for marine treatment schemes"**, Vol. I, II, III y IV, Unit Kingdom, 1990.

Wright, S.J., Wong, D.R., Zimmerman, K.E., **"Outfall diffuser behavior in stratified ambient fluid"**, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 108, No HY4, Pag 483-501, 1982.

World Wave Atlas, <http://www.oceanor.com>, 2002

ANEXO A MODELOS

A Anexo 1

A.1 Modelo UM3

A.1.1 Desarrollo matemático

Como ya se mencionó anteriormente, el modelo UM considera un elemento con forma de cono inclinado y no un cilindro. Las consecuencias de este hecho no pueden ser menospreciadas ya que de la forma del elemento se determina el área proyectada, la cual influye en los arrastres considerados. Generalmente un cono inclinado tiene un área proyectada que difiere sustancialmente del área proyectada por un cilindro, por lo que los términos de crecimiento y curvatura son necesarios para calcular adecuadamente el área proyectada

Basándose en el principio de superposición, los 2 tipos de arrastre pueden ser descritos por separado. La condición de arrastre para el área proyectada indica que

$$\frac{dm}{dt} = \rho_a A_p u \quad (\text{A.1})$$

donde dm es el incremento de masa dado un incremento de tiempo dt , A_p es el área proyectada y u es la velocidad local normal al área proyectada, ρ_a es la densidad del agua de mar. Esta hipótesis, despreciando por un momento el arrastre de Taylor, hace posible explicar el comportamiento de la pluma

La ecuación (A.1) puede escribirse en términos vectoriales como,

$$\frac{dm}{dt} = \rho_a \overline{A_p U} \quad (\text{A.2})$$

Los vectores correspondientes al área y a la velocidad son opuestos, por lo que su producto punto es negativo.

Para estimar el área proyectada es necesario expresar matemáticamente como cambia la longitud del elemento, h , en función de las variaciones de otras propiedades de la pluma. Los cambios en h se deben principalmente a la diferencia de velocidades entre las caras delantera y trasera del elemento, lo cual origina que las caras converjan o diverjan con el tiempo. Como la masa se conserva, cambios en h indican cambio en el radio.

De acuerdo a la Figura A.1, \overline{V} es la diferencia de velocidades de 2 caras opuestas, los vectores de velocidad son proporcionales a los vectores de desplazamientos mostrados. También, en ambas formulaciones el elemento es infinitesimal a lo largo de la trayectoria, por lo tanto es un volumen de integración híbrido, el cual es tratado de manera diferente que los elementos verdaderos de volumen infinitesimal.

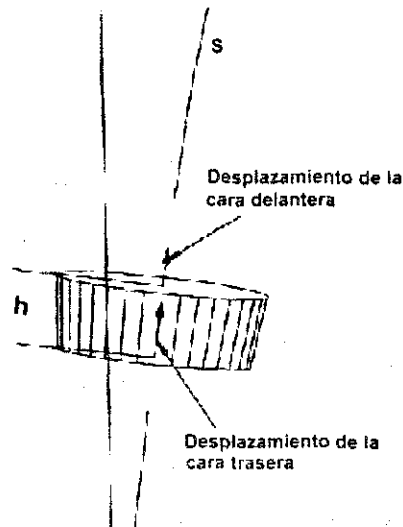


Figura A.1. Convergencia de las caras del elemento debido a la diferencia de velocidades

Debido a que en la formulación lagrangiana hay elementos materiales y se asume que la velocidad es constante, las caras se separan o convergen proporcionales a V , por lo que:

$$\Delta h = \Delta V \cdot \delta t \tag{A.3}$$

donde δt es un incremento de tiempo arbitrario, pero constante. Integrando la ecuación (A.3) y considerándose que las correspondientes diferenciales de velocidad y de longitud son V_0 y h_0 y V y h se obtiene

$$\int_{h_0}^h dh = \delta t \cdot \int_{u_{s0}}^{u_s} du_s \tag{A.4}$$

donde $u_s = V$ y $u_{s0} = V_0$ la ecuación (A.4) puede ser integrada para obtener:

$$h - h_0 = (u_s - u_{s0}) \delta t \tag{A.5}$$

Finalmente, si δt se escoge como h_0/u_{s0}

$$\frac{h}{h_0} = \frac{u_s}{u_{s0}} \tag{A.6}$$

por lo que se observa que u_s y h cambian proporcionalmente

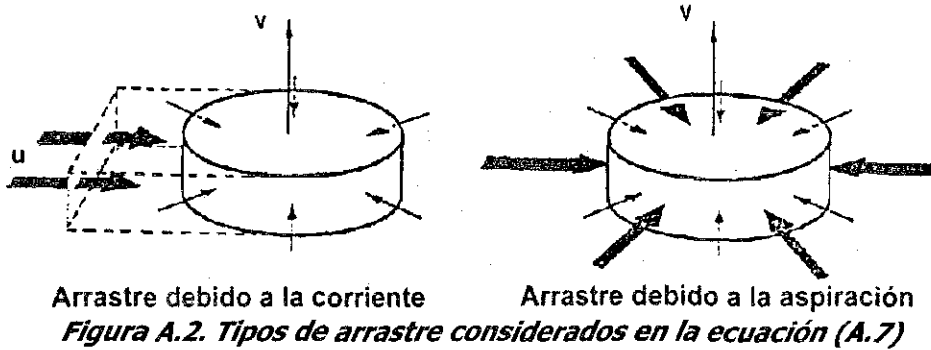
Las ecuaciones de conservación utilizadas en este modelo son las siguientes

A.1.1.1 Conservación de la masa

$$\frac{dm}{dt} = E_{amb} + E_\alpha \tag{A.7}$$



donde E_{amb} es el arrastre debido a las corrientes, E_a es el arrastre debido a la aspiración tipo Taylor y m es la masa, en la Figura A.2 se esquematizan los 2 tipos de arrastre que se presentan en la ecuación (A.7)



El arrastre debido a las corrientes se calcula con:

$$E_{amb} = \rho A_p \bar{U} \tag{A.8}$$

Donde ρ es la densidad del agua, A_p es el área proyectada de la sección y \bar{U} es el vector de velocidades del agua de mar cerca del elemento.

El segundo término se calcula con:

$$E_a = \alpha \rho A_T |\bar{V}| \tag{A.9}$$

Donde A_T es el área de la sección en contacto con el ambiente (generalmente $2\pi b h$, donde b es el radio medio y h es el espesor de la sección), V es la velocidad media a través de la sección y α es la función de arrastre, la cual para un perfil de velocidades rectangular (tipo sombrero de copa) puede tomarse como 0.1 según Muellenhoff *et al* (1985). Estos términos pueden evaluarse a partir de las condiciones iniciales para la sección, la suma de estos términos dan la razón de cambios de la masa en el elemento, una vez que son determinados se pueden calcular el cambio en la cantidad de movimiento, la energía y la concentración de sustancias con las ecuaciones (A.16), (A.17) y (A.19) respectivamente.

La derivación del área proyectada es más difícil que derivar el área del arrastre de Taylor, una aproximación que se emplea a las plumas tridimensionales es útil, el vector \bar{U} se puede transformar en 3 vectores que corresponden a un sistema coordenado, como se muestra en la Figura A.3

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

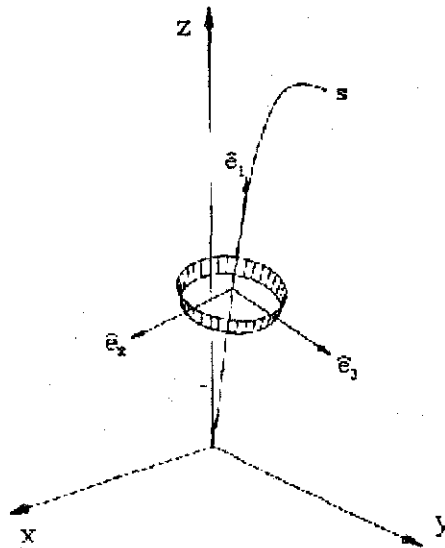


Figura A.3. Sistema local de coordenadas

El vector de velocidades puede expresarse como la suma de componentes en cada una de las direcciones locales, como se indica en:

$$\bar{U} = u_1 \hat{e}_1 + u_2 \hat{e}_2 + u_3 \hat{e}_3 \quad (\text{A.10})$$

Donde \hat{e}_1 , \hat{e}_2 y \hat{e}_3 son los vectores unitarios en la dirección de la trayectoria, la normal horizontal a la trayectoria y en un plano vertical respectivamente. El vector \hat{e}_3 puede expresarse en términos de lo producto cruz entre \hat{e}_1 y \hat{e}_2

$$\hat{e}_3 = \hat{e}_1 \times \hat{e}_2 \quad (\text{A.11})$$

Cada componente de la velocidad corresponde a un área proyectada. En la Figura A.4 se indican las áreas que considera el arrastre forzado. Si se desprecia la fusión, el colapso y el traslape, el área proyectada asociada a u_1 , es A_{1i} , la cual es simplemente es un anillo que se alabea alrededor de la pluma.

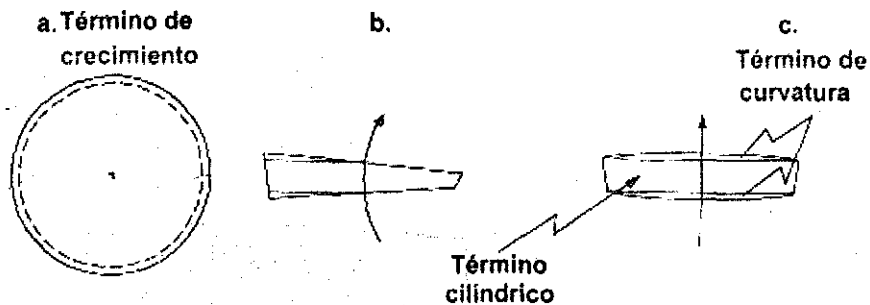


Figura A.4. Componentes del área proyectada.

$$A_1 = \pi b \Delta b \tag{A.12}$$

Donde Δb es la diferencia entre los radios de las caras delantera y trasera del elemento en cuestión. Esta es la contribución por crecimiento para el área proyectada.

La diferencia en el radio sobre la longitud del elemento es

$$\Delta b = \frac{\partial b}{\partial s} h \tag{A.13}$$

Donde s es la distancia a lo largo de la línea central. La derivada se estima a partir de la diferencia entre los radios en pasos sucesivos dividida por la distancia que viaja.

Cada una de las componentes u_2 y u_3 tienen dos áreas asociadas a ellas, una de las cuales es debida a la curvatura de la trayectoria de la pluma, la otra es corresponde a la proyección del cilindro.

El área que corresponde al cilindro es:

$$A_{cil} = 2\pi b h \tag{A.14}$$

El cambio en la dirección de la velocidad media de la pluma, \bar{V} , el cual es paralelo a \hat{e}_1 , sobre la longitud del elemento h , en otras palabras, la curvatura de la de la línea central s , produce la componente de la curvatura del área proyectada. Debido a que las caras que definen el elemento son normales a s , en las regiones donde se presenta una fuerte curvatura el elemento adquiere forma de cuña, una descripción de este fenómeno se da en la Figura A.5.

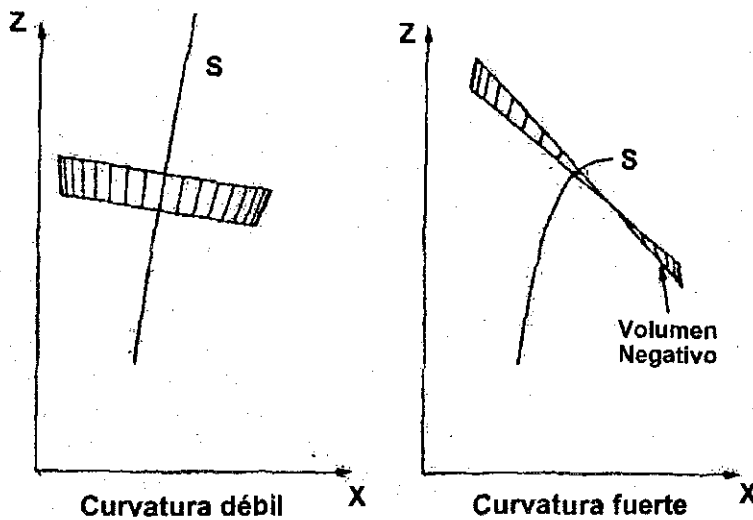


Figura A.5. Diferentes grados de curvatura para el elemento de la pluma.

La componente de la curvatura del área proyectada es



$$A_{Cur} = \frac{\pi}{2} b^2 \frac{\partial \theta}{\partial s} h \quad (A.15)$$

donde θ es la elevación del ángulo de s , esta área puede ser positiva o negativa dependiendo del signo de $\partial \theta / \partial s$, el cual se determina con base en valores sucesivos del vector \bar{U} , una curvatura positiva tiene como efecto reducir el área total proyectada.

Históricamente los términos de crecimiento y curvatura no habían sido reconocidos o se había pensado que eran muy pequeños comparándolos con el término cilíndrico (Schatzmann, 1979), sin embargo en realidad las tres contribuciones para el área total proyectada son importantes.

A.1.1.2 Conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{dm\bar{U}}{dt} = \bar{U}_{\infty} \frac{dm}{dt} - mg \frac{(\rho_{\infty} - \rho)}{\rho} \quad (A.16)$$

El primer término de la ecuación (A.16) representa el cambio total en la cantidad de movimiento en la sección, el cual es un vector, el segundo término es el cambio en la cantidad de movimiento producida por el arrastre del agua que rodea la rebanada, el tercer término es el cambio vertical en la pluma producido por la flotación de este debido a la diferencia entre las densidades del efluente y el agua de mar.

Es importante aclarar que el elemento con el cual se modela la pluma es infinitesimal solamente con respecto a la línea central, y que en las direcciones perpendiculares a esta puede ser muy extenso, por lo que la velocidad ambiental U puede variar significativamente. En el modelo UM se aproxima la velocidad ambiental al nivel de la partícula.

En la ecuación (A.16) se puede observar que el cambio en la cantidad de movimiento en el elemento se debe a la cantidad de movimiento que se introduce por medio de la masa arrastrada dm y al cambio en la cantidad de movimiento vertical generado por la fuerza de flotación. Esta suposición implícita permite obviar los efectos de arrastre, lo cual es consistente con la hipótesis de que el elemento tiene las mismas propiedades que el fluido en las fronteras y por consiguiente no hay cortantes que puedan generar arrastre

A.1.1.3 Conservación de la energía

$$\frac{d[mC_p(T - T_{ref})]}{dt} = C_p(T_{\infty} - T_{ref}) \frac{dm}{dt} \quad (A.17)$$

En la ecuación (A.17) asume que toda la energía es térmica y se desprecian las reacciones químicas que potencialmente pueden producir un cambio en la temperatura. En dicha ecuación C_p es el calor específico a una presión constante, T , T_a y T_{ref} son la temperatura media del elemento, la temperatura ambiental y una temperatura de referencia, respectivamente. Si se asume que C_p es constante en el rango de interés, la ecuación (A.17) se simplifica a

$$\frac{dmT}{dt} = T_a \frac{dm}{dt} \quad (A.18)$$

A.1.1.4 Conservación de sustancias

$$\frac{dmC_i}{dt} = C_\infty \frac{dm}{dt} - kmC_p \quad (A.19)$$

En esta ecuación el último término considera el decaimiento de la sustancia que se desea modelar, si se trata de un contaminante conservativo k es igual a cero.

En las ecuaciones anteriores, C_i es la especie en consideración, el subíndice ∞ se refiere a las condiciones ambientales, k es el coeficiente de decaimiento de primer orden, T es la temperatura, ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad y C_p es el calor específico.

El coeficiente de decaimiento k , se calcula, según Mancini (1978), con la expresión

$$k = (0.8 + 0.006(\% \text{ agua salada})) \times 1.07^{(t-20)} + \frac{I_A}{k_e H} (1 - e^{-k_e H}) \quad (A.20)$$

Donde H es la profundidad total de la columna de agua, I_A es la radiación solar media diaria en la superficie (langleys/hr, es decir, cal/cm²/hr), k_e es el coeficiente de extinción solar (adquiere un valor típico de 0.16m⁻¹) y t es la temperatura (° C). En la expresión anterior, se ha asumido que la radiación, conducción y difusión muy pequeñas con respecto a los otros términos, por lo que la salinidad y la temperatura se consideran como propiedades conservativas

La salinidad se puede estimar a través de la siguiente relación:

$$\frac{dmS}{dt} = S_a \frac{dm}{dt} \quad (A.21)$$

Donde S y S_a son las salinidades media del elemento y del ambiente, respectivamente. Se debe tener especial cuidado con no confundir el símbolo de la salinidad con el de la dilución de la pluma.

A.1.2 Condiciones de frontera

Para describir completamente el problema, las condiciones de frontera e iniciales deben ser especificadas. La condición principal de frontera es la localización del inicio del flujo, a partir de la cual las subsecuentes posiciones de los elementos pueden ser determinadas por medio de la integración de la relación trivial

$$\frac{d\bar{R}}{dt} = \bar{V} \quad (A.22)$$

Donde \bar{R} es el vector de los radios de las partículas medido desde el centro de masa del elemento. El nuevo R se calcula a partir de

$$R_{t+dt} = R_t + \bar{V} dt \quad (A.23)$$

A.1.2.1 Traslape

En algunos casos, la trayectoria de la pluma, debido a la alta velocidad de las corrientes, adquiere un radio de curvatura que logra que los elementos se intercepten, es decir, se traslapen, como se indica en la Figura A.6, lo cual no es posible físicamente, además la asimetría en la forma no es consistente con la práctica convencional de construir elementos radiales simétricamente con respecto a la trayectoria. La trayectoria de la pluma representa los centros de masa de los elementos que conforman la pluma los cuales no necesariamente son los centros de las secciones circulares.

El tratamiento riguroso de estas complicaciones está más allá del alcance del modelo UM, sin embargo, cuando ocurre el traslape se interrumpe el cálculo de la dilución inicial

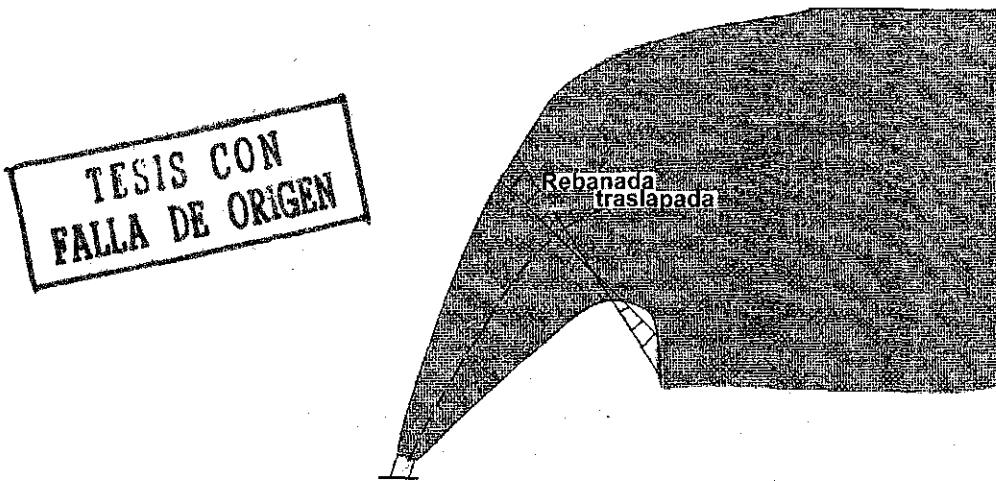


Figura A.6. Rebanada traslapada, considerada en el modelo UM

A.1.2.2 Combinación de plumas

Como ya se mencionó anteriormente, cuando se analiza una descarga a través de múltiples puertos y las plumas provenientes de cada uno de estos puertos se han combinando, el arrastre es modificado para reflejar el decrecimiento en el área de contacto, lo cual afecta los dos tipos de arrastre.

Se asume que las plumas son idénticas y cualquier interacción entre estas es mutua, es decir, las pérdidas son iguales a las ganancias.

Considerando primero el arrastre de Taylor, las condiciones de fusión son representadas en la Figura A.7, en esta se ve que el área correspondiente a este arrastre puede multiplicarse por un factor igual a la relación entre la circunferencia expuesta y la circunferencia total, para reducir el área de exposición. Asumiendo que no hay traslape, el lado de la pluma que es más largo y grande en área debido a la trayectoria curva se compensa con el lado más corto y pequeño.

La relación de corrección para el arrastre de Taylor es:

$$a_T = \frac{\pi + 2\varphi}{\pi}$$

(A.24)



donde:

$$\varphi = \arctan \left(\sqrt{\frac{4b^2 + L^2}{L^2}} \right) \quad (\text{A.25})$$

φ se define en la Figura A.7, L es la distancia entre puertos. El mismo factor de corrección se aplica al primer término del arrastre forzado.

Es importante aclarar que en el análisis anterior se asume que la corriente es perpendicular al eje del difusor, este método de reducción es válido para ángulos entre 45 y 135 grados, en los cuales se multiplica L por el factor $\sin \psi$, donde ψ es el ángulo entre la corriente y el eje del difusor

El factor de corrección para el área del cilindro proyectada es:

$$a_{cil} = \frac{L}{2b} \quad (\text{A.26})$$

El factor de corrección para el arrastre debido a la curvatura es:

$$a_{cur} = 1 + \frac{2\varphi}{\pi} + \frac{\sin 2\varphi}{\pi} \quad (\text{A.27})$$

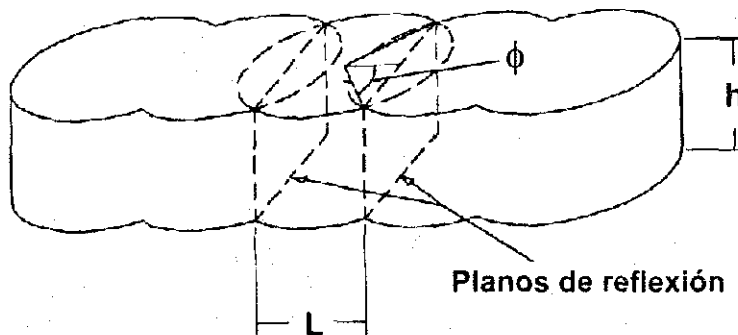


Figura A.7. Plumitas combinadas y planos de reflexión

La integración de las ecuaciones se realiza paso a paso calculando la trayectoria de la pluma, el tamaño, la temperatura media y la concentración y la dilución media en la pluma. La velocidad ambiental, temperatura y salinidad son usadas en cada sección vertical por las que pasa la pluma. Estas propiedades ambientales son expresadas en función de la profundidad.

A.2 Modelos Eulerianos

Los modelos eulerianos tienen un volumen de control fijo y calculan los cambios en las propiedades de los fluidos que entran y salen a través de este, las ecuaciones están expresadas en derivadas espaciales, a diferencia de los modelos lagrangianos en los cuales las derivadas están con respecto al tiempo. El Modelo UDKHG usa una aproximación euleriana y métodos integrales para convertir las

ecuaciones de gobierno, las cuales tiene derivadas parciales, en una serie ordinaria de ecuaciones diferenciales.

Se ha encontrado que este método produce muy buenas aproximaciones para determinar el comportamiento de fluidos siempre y cuando los efectos de frontera no intervengan en el problema. Los métodos integrales requieren que se asuman perfiles de distribución para las velocidades, temperatura y concentraciones.

A.2.1 Modelo DKHG

A.2.1.1 Desarrollo teórico

El esquema básico de cómputo para el UDKHG está basado en el análisis de Hirst (1971), cual desarrolló un análisis en 3 dimensiones para la descarga de múltiples puertos sumergidos en un ambiente estratificado, y con corrientes en cualquier dirección con respecto al eje del difusor. También él desarrolló las ecuaciones de movimiento y energía a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes y las ecuaciones de transporte de energía.

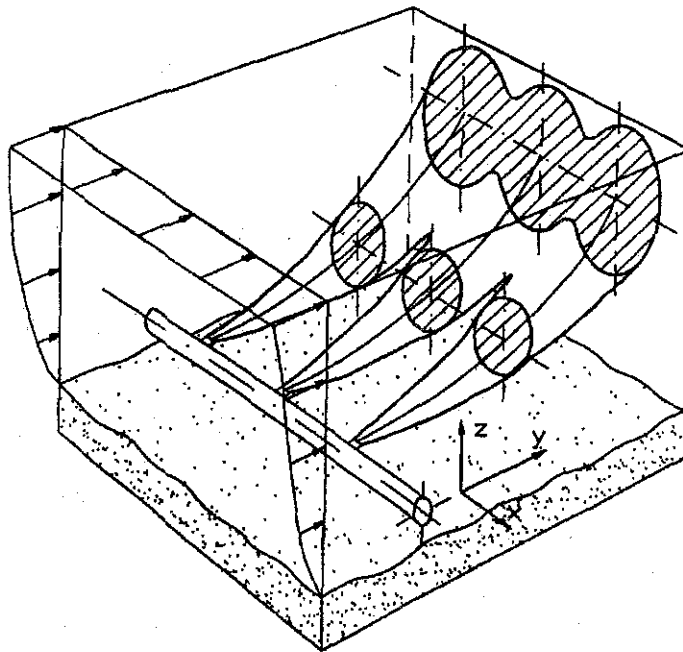


Figura A.8. Definición de coordenadas para una pluma tridimensional

La Figura A.8 muestra el esquema seguido por una pluma en 3 dimensiones y las coordenadas usadas, para asumir simetría y poder integrar en la dirección radial, estas ecuaciones fueron expresadas de la siguiente manera

A.2.1.2 Conservación de la masa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\frac{d}{ds} \int_0^{\infty} u r dr = E \tag{A.28}$$

La ecuación (A.28) indica que el cambio en la tasa de flujo en el interior de la pluma es igual a la entrada de fluido, E . Esta entrada de fluido es debido al arrastre forzado, arrastre de aspiración y el arrastre de tipo térmico-flotante, que se calculan con la ecuación (A.35).

A.2.1.3 Conservación de la energía

$$\frac{d}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} \left(\bar{T} - \bar{T}_a \right) r dr = \frac{d\bar{T}_a}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} r dr - \lim_{r \rightarrow \infty} \left(r \bar{v} \bar{T} \right) \quad (\text{A.29})$$

El primer término de la ecuación (A.29) representa el exceso total de energía térmica en la pluma, el segundo término representa el cambio en el exceso de energía térmica debido a la temperatura estratificada (el ambiente de referencia está cambiando), el último término con el parámetro de turbulencia v es el intercambio de la energía térmica debido a la turbulencia en el ambiente en los bordes de la pluma. La capacidad calórica se asume constante y se cancela en todos los términos.

A.2.1.4 Conservación de Sustancias

Esta ecuación es la misma que la ecuación para conservación de la energía, y sólo se reemplaza la concentración por la temperatura.

$$\frac{d}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} \left(\bar{C} - \bar{C}_a \right) r dr = \frac{d\bar{C}_a}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u} r dr - \lim_{r \rightarrow \infty} \left(r \bar{v} \bar{C} \right) \quad (\text{A.30})$$

A.2.1.5 Conservación de la cantidad de movimiento sobre la trayectoria

$$\frac{d}{ds} \int_0^{\infty} \bar{u}^2 r dr = \bar{u}_a E \sin \theta_1 + \int_0^{\infty} g (\rho - \rho_0) r dr \sin \theta_2 - \lim_{r \rightarrow \infty} \left(r \bar{u} \bar{v} \right) \quad (\text{A.31})$$

El primer término de la ecuación (A.31) es el cambio en la cantidad de movimiento en la dirección del eje de la pluma, el segundo es el cambio en la cantidad del movimiento debido al arrastre ambiental, el tercer término es el cambio debido a la diferencia de densidades entre el efluente y el agua del océano y el último término representa los cambios a los que contribuye la turbulencia ambiental.

El ángulo θ_1 es el que forma la dirección relativa de la pluma con la corriente, el ángulo θ_2 es el ángulo que forma la dirección relativa de la pluma con la horizontal.

La ecuación de la cantidad del movimiento puede dividirse en componentes para relacionar los cambios en la dirección del flujo, estos se dan en forma de las ecuaciones de curvatura, como se indica a continuación

$$\frac{d\theta_2}{ds} = \frac{g \int_0^{\infty} (\rho - \rho_{\infty}) r dr \cos \theta_2 - E U_a \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\bar{q}} \quad (\text{A.32})$$

$$\frac{d\theta_1}{ds} = \frac{EU_a \cos \theta_1}{q \cos \theta_2} \quad (\text{A.33})$$

$$\bar{q} = \int_0^{\infty} \bar{u}^2 r dr - \frac{E^2}{4} \sin \theta_1 + \lim_{r \rightarrow \infty} \left(r^2 \bar{v}^2 \right) \quad (\text{A.34})$$

La precisión de los cálculos depende en gran parte de que tan exactamente es calculado el arrastre, Kannberg y Davis (1976) proponen la siguiente expresión:

$$E = \left(a_1 + \frac{a_2}{F_L} \right) \left[b |u_c - U_a \cos \theta_2| \left(1 - \frac{a_4 b}{L} \right) + a_3 U_a \sin \theta_2 \right] \quad (\text{A.35})$$

Los coeficientes a_i son determinados experimentalmente, F_L es el número de Froude local, el primer término en el lado derecho representa arrastre denominado "Aspiración tipo Taylor" y el arrastre de tipo térmico-flotante, el segundo término calcula el decrecimiento en el arrastre del fluido debido al encuentro entre plumas adyacentes del mismo efluente y es función de que tan grande es la descarga, b , y del espaciamiento entre puertos, L , el último término es el arrastre debido a las corrientes ambientales

En la zona donde el flujo se establece, los perfiles cambian de forma, ya no es la forma asumida de sombrero de copa, como al inicio de los puertos, sino a un perfil de forma acampanada (perfil gaussiano), después de la zona donde el flujo se establece, esta la región donde se desarrollan completamente las plumas individuales, es aquí donde los perfiles mantienen el tipo de perfil, solo cambian en magnitud, después se encuentra la zona donde se combinan todas las plumas y se forma una sola, esta zona puede presentarse en cualquier lugar de la trayectoria del efluente y es función de las condiciones ambientales y del espaciamiento inicial de los puertos.

Se ha encontrado por medio de experimentos, Hirst 1971, que la turbulencia de chorro domina el arrastre en el campo cercano, mientras que la turbulencia ambiental tiene muy poca importancia como resultado de esto. Por lo tanto, los términos donde se considera a la turbulencia ambiental pueden ser ignorados, con lo cual las ecuaciones de gobierno ((A.28) a (A.35)) pueden ser integradas cuando los perfiles de velocidad, concentración y temperatura han sido seleccionados.

Las plumas empiezan a unirse cuando el ancho de cada uno de ellas es igual a la separación entre puertos, en la Figura A.9 se muestra un corte de las plumas ya uniéndose

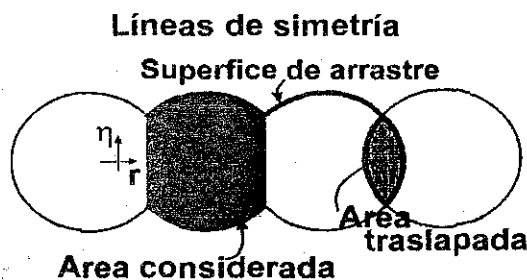


Figura A.9. Sección transversal de las plumas combinadas

En la Figura A.10 se indica la forma aproximada de la distribución de la concentración a lo largo de una línea que conecta el centro de cada pluma individual con al región de superposición, donde las plumas se han unido con los que están a sus lados.

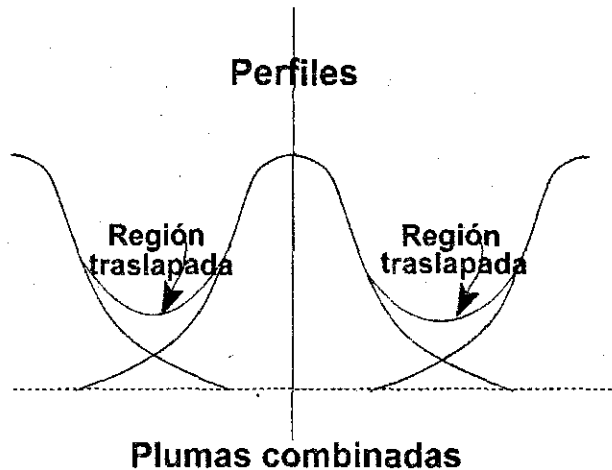


Figura A.10. Distribución de la concentración a lo largo de las plumas que se combinan

El perfil de temperatura en la dirección r en una línea que conecta las plumas en la zona donde estos ya se han unido, el cual se puede definir como:

$$\Delta T_r = \Delta T_c \left\{ \left[1 - \left(\frac{r}{b} \right)^{3/2} \right]^2 + \left[1 - \left(\frac{L-r}{b} \right)^{3/2} \right]^2 \right\} \quad (A.36)$$

En la dirección η , la cual es perpendicular a la dirección r , el perfil de temperatura está dado por:

$$\Delta T_\eta = \Delta T_r \left[1 - \left(\frac{\eta}{c} \right)^{3/2} \right]^2 \quad (A.37)$$

donde

$$c = \sqrt{b^2 - r^2} \quad (A.38)$$

Expresiones similares se utilizan para los perfiles de velocidad, densidad y concentración. Cuando se están resolviendo las ecuaciones de gobierno, estos pueden ser integrados para obtener ecuaciones diferenciales ordinarias que se apliquen a la región de fusión. Cuando ya se está en la región donde se unen todas las plumas, se asume que las propiedades solamente cambian en la dirección η . El arrastre por la superficie solo se considera en la superficie que está en contacto con el agua de mar, como se muestra en la figura 5 y varía con el grado de fusión de las plumas individuales

A.2.2 Modelo PDSG

El modelo PDSG deriva su nombre de los iniciales de los investigadores Prych, Davis y Shirazi. Este modelo se utiliza para caracterizar las descargas superficiales debido a que estas se comportan de manera diferente a las descargas sumergidas debido al efecto de la superficie libre, lo cual ocurre

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

cuando la descarga de un efluente que puede flotar se realiza cerca de la superficie libre o por medio de un canal se descarga en un río, lago o directamente en la costa. Si la descarga es menos densa que el agua que la recibe, se obliga a que la descarga se dirija hacia arriba.

En el caso anterior, la superficie actúa como una tapa, por lo cual al dirigirse la pluma hacia arriba esta será cada vez más delgada y se producirá una dispersión lateral en todas las direcciones, lo cual disminuye el arrastre vertical. La pluma resultante es delgada, ancha y con muy poco arrastre, excepto en la descarga. Además si la descarga es caliente, la transferencia de calor en la superficie reduce la temperatura y la energía térmica no es conservada como en una descarga sumergida. Todo esto debe tenerse en cuenta en los modelos de superficie.

A.2.2.1 Desarrollo teórico

El modelo PDSG es un modelo integral como el UDKHG y el UM donde las ecuaciones de movimiento son integradas a través de la pluma asumiendo perfiles representativos de velocidad, concentración de sustancias y temperatura. El análisis teórico usado para el desarrollo del modelo tridimensional de superficie del programa PDS se basa en el modelo de Prych (1972), este a su vez fue modificado por Davis y fue ajustado a datos por Shirazi (1972) (año), el modelo PDSG es el modelo PDS con una salida gráfica para los resultados.

Este modelo fue originalmente desarrollado para descargas térmicas, sin embargo se aplica fácilmente a otro tipo de descargas, se asume que la descarga se hace a través de una ribera en un gran cuerpo de agua donde no hay otras orillas que puedan interferir, como se muestra en la Figura A.11.

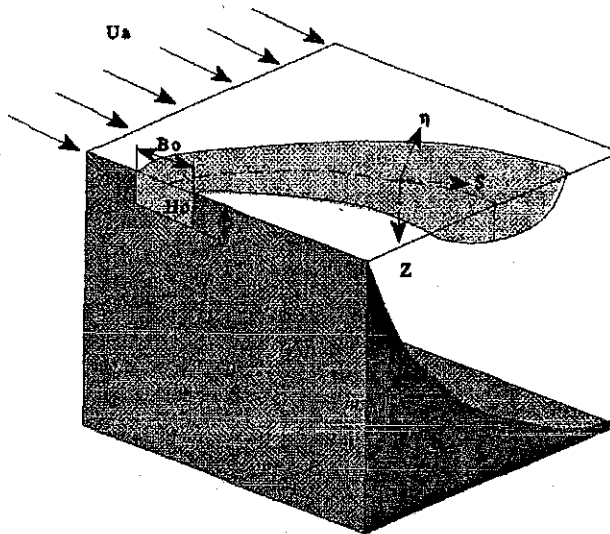


Figura A.11. Esquema de la pluma superficial descrita con el modelo PDSG en coordenadas locales

El canal de descarga se asume rectangular con una profundidad H_0 y un ancho B_0 , el sistema de coordenadas tiene su eje Z dirigido hacia el fondo, el eje horizontal η es normal al eje central de la pluma, los perfiles se asumen gaussianos en la dirección horizontal y medio-gaussianos en la dirección vertical, por lo que se tiene

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$T_r = T \exp\left(\frac{-\eta^2}{B^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-Z^2}{H^2}\right) \quad (\text{A.39})$$

$$U_r = U \exp\left(\frac{-\eta^2}{B^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-Z^2}{H^2}\right) + V \cos \theta \quad (\text{A.40})$$

Donde T y U son los valores en la línea central de la temperatura y la velocidad respectivamente, V es la velocidad media ambiental, los límites para η están entre $-\infty$ y $+\infty$, mientras que los límites para Z varían entre 0 y ∞ . H y B son la profundidad y ancho medios, definidos como $\sqrt{2}$ de la desviación estándar de los perfiles gaussianos en las direcciones vertical y horizontal.

Con los perfiles de temperatura y velocidad calculados, la energía, el volumen y los flujos de la cantidad de movimiento pueden ser integrados en cualquier sección transversal de la pluma, dejándolos en términos de B y H , el flujo de volumen es por lo tanto

$$Q = \iint_A (U_r) d\eta dZ = \pi HB \left(\frac{U}{2} + V \cos \theta \right) \quad (\text{A.41})$$

Donde los límites de integración para $V \cos \theta$ son tomados como la mitad inferior de la región:

$$\left(\frac{\eta}{\sqrt{2}b} \right)^2 + \left(\frac{Z}{\sqrt{2}H} \right)^2 \leq 1 \quad (\text{A.42})$$

Resolviendo para U la ecuación (A.41), se obtiene

$$U = 2 \cdot \left(\frac{Q}{\pi HB} - V \cos \theta \right) \quad (\text{A.43})$$

Para el flujo de calor, J , la ecuación es:

$$J = \iint_A U_r T_r d\eta dZ = \frac{\pi}{2} TBH \left(\frac{U}{2} + V \cos \theta \right) = \frac{QT}{2} \quad (\text{A.44})$$

El flujo de cantidad de movimiento es:

$$M = \iint_A U_r^2 d\eta dZ = \pi BH \left(\frac{U}{2} + V \cos \theta \right)^2 = \frac{Q^2}{\pi BH} \quad (\text{A.45})$$

Los cambios en el gasto, temperatura y cantidad de movimiento están dados por:

$$\frac{dQ}{ds}, \frac{dT}{ds}, \frac{dM}{ds} \quad (\text{A.46})$$

Los cuales son calculados de las ecuaciones de conservación. El cambio en el caudal se asume que tiene 2 componentes: la primera debida a las contribuciones del arrastre de chorro y la segunda debida a la mezcla turbulenta debido al ambiente, lo cual se expresa como:

$$\frac{dQ}{ds} = \frac{dQ}{ds}\Big|_j + \frac{dQ}{ds}\Big|_a \quad (\text{A.47})$$

Las dos componentes se dividen a su vez en una contribución vertical y otra horizontal, la componente horizontal del arrastre de chorro es:

$$\frac{dQ}{ds}\Big|_{j,h} = 2E_o \int_{-\sqrt{2}H}^0 \Delta U dZ \quad (\text{A.48})$$

donde:

$$\Delta U = (U^2 + V^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \exp\left(\frac{-Z^2}{H^2}\right) \quad (\text{A.49})$$

donde E_o es el coeficiente de arrastre, reemplazando la ecuación (A.49) en (A.48) se obtiene:

$$\frac{dQ}{ds}\Big|_{j,h} = \sqrt{\pi} H E_o (U^2 + V^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (\text{A.50})$$

La componente vertical del arrastre de chorro es:

$$\frac{dQ}{ds}\Big|_{j,v} = 2 \int_0^{\sqrt{2}B} E \Delta U_v d\eta \quad (\text{A.51})$$

Donde $E = E_o f(R_i)$ y R_i es el número de Richardson local, el cual se calcula con (A.52):

$$R_i = \frac{\sqrt{2} HT(s, \eta, o)}{F_o^2 \Delta U_v^2} \quad (\text{A.52})$$

La función $f(R_i)$ es una curva ajustada a datos experimentales, la cual es:

$$f(R_i) = \frac{\exp(-5R_i) - 0.0183}{0.962} \quad (\text{A.53})$$

La diferencia de velocidades ΔU_v se calcula con (A.54):

$$\Delta U_v = \left[U^2 \exp\left(\frac{-2\eta^2}{B^2}\right) + V^2 \sin^2 \theta \right]^{1/2} \quad (\text{A.54})$$

El término T es el exceso de temperatura en la superficie a una distancia η del centro de la pluma.

Las componentes horizontal y vertical del arrastre debido a la turbulencia ambiental se calculan con (A.55) y (A.56), respectivamente:

$$\left. \frac{dQ}{ds} \right|_{a,h} = 11.0 \frac{H}{B} \frac{\varepsilon_h}{U_o H_o} \quad (\text{A.55})$$

$$\left. \frac{dQ}{ds} \right|_{a,v} = 11.0 \frac{H}{B} \frac{\varepsilon_v}{U_o H_o} f(R_i) \quad (\text{A.56})$$

Donde ε_h y ε_v son los coeficientes de difusión turbulenta horizontal y vertical respectivamente.

El cambio el flujo de calor a través de la pluma está determinado por:

$$\frac{dJ}{ds} = -2 \int_0^{\sqrt{2}B} KT, d\eta = \sqrt{\pi KTB} \quad (\text{A.57})$$

Donde K es un coeficiente adimensional de intercambio de calor, sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación (A.49) se obtiene:

$$\frac{dT}{ds} = -\frac{T}{Q} \left(2\sqrt{\pi KB} + \frac{dQ}{ds} \right) \quad (\text{A.58})$$

La conservación de la cantidad de movimiento es aplicada en la dirección S y luego se divide en sus componentes X y Y . La fuerza neta sobre la pluma es balanceada por el cambio en el flujo de la cantidad de movimiento. Las fuerzas que se consideran son dos, las fuerzas de presión interna debido a la flotación y las fuerzas de arrastre debido a la corriente ambiental y las fuerzas de cortante entre secciones.

Las fuerzas de presión son determinadas encontrando el exceso de presión debido a la flotación como una función de la profundidad y luego integrando la presión sobre una sección vertical de la pluma, la fuerza de presión normalizada es (A.59):

$$P = \frac{1}{F_0^2} \iint_A \left(\int_{-\infty}^z T_r dZ \right) dA = \frac{\sqrt{\pi} TH^2 B}{2F_0^2} \quad (\text{A.59})$$

Donde F_0 es el número de Froude densimétrico para descarga el cual esta dado por (A.60):

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} g H_0}} \quad (\text{A.60})$$

Los sufijos a y 0 se refieren a las condiciones ambientales y de la descarga respectivamente.

La fuerza de arrastre sobre la pluma, se calcula con la expresión (A.61), la cual es la misma expresión que se utiliza para la evaluación de la fuerza de arrastre sobre un cuerpo sumergido.

$$F_D = \frac{1}{2} \sqrt{2} C_D H V |V| \sin^2 \theta \quad (\text{A.61})$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre

Las fuerzas de cortante entre caras se asumen similares a las que se presentan en un flujo turbulento sobre una superficie plana con un espesor de $(2)^{1/2} H$ y una velocidad igual al vector diferencia entre las velocidades dentro de la pluma y la corriente ambiental, las componentes X y Y de esta fuerza cortante son (A.62) y (A.63):

$$SF_x = C_F \left(\frac{1}{R_e H} \right)^{1/4} \int_0^{\sqrt{2}B} \Delta U_v^{3/4} \left[V \sin^2 \theta - U \cos \theta \exp\left(\frac{-\eta^2}{B^2}\right) \right] d\eta \quad (\text{A.62})$$

$$SF_y = -C_F \left(\frac{1}{R_e H} \right)^{1/4} \int_0^{\sqrt{2}B} \Delta U_v^{3/4} \left[V \cos \theta - U \exp\left(\frac{-\eta^2}{B^2}\right) \right] d\eta \quad (\text{A.63})$$

Donde C_F es el coeficiente de fricción y R_e es el número de Reynolds del chorro de descarga, el valor de C_F se determina experimentalmente.

El cambio en la cantidad de movimiento del flujo incluye el efecto de la cantidad de movimiento del arrastre del fluido ambiental, $V (dQ/ds)$, el cual actúa en la dirección X . Igualando las ecuaciones de las fuerzas para el cambio en el flujo de la cantidad de movimiento en las direcciones X y Y se obtiene.

$$\frac{d}{ds} [(M + P) \cos \theta] = SF_x + F_D \sin \theta + V \frac{dQ}{ds} \quad (\text{A.64})$$

$$\frac{d}{ds} [(M + P) \sin \theta] = SF_y - F_D \cos \theta \quad (\text{A.65})$$

Usando las ecuaciones (A.45) y (A.59) para M y P , multiplicando la ecuación (A.64), por $-\sin \theta$, la ecuación (A.65) por $\cos \theta$ y combinando ambas expresiones se obtiene una ecuación para el cambio en la dirección del flujo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\frac{dQ}{ds} = \frac{SF_y - SF_x \sin \theta - F_D V \sin \theta (dQ/ds)}{\frac{Q^2}{\pi BH} + \frac{\sqrt{\pi}}{2F_0^2} TH^2 B} \quad (\text{A.66})$$

Diferenciando M y P y multiplicando la ecuación (A.64) por $\cos \theta$ y ecuación (A.65) por $\sin \theta$ y combinándolas se obtiene el cambio con la profundidad.

$$\frac{dH}{ds} = \frac{\left[SF_y \sin \theta + SF_x \cos \theta + (V \cos \theta - 2Q/\pi BH)(dQ/ds) - \left(\sqrt{\pi} BH^2/2F_0^2 \right) (dT/ds) + \left(Q^2/\pi BH - \sqrt{\pi} H^2/2F_0^2 \right) (dB/ds) \right]}{\left[\sqrt{\pi} TBH/2F_0^2 - Q^2/\pi BH^2 \right]} \quad (\text{A.67})$$

La cantidad de movimiento en la dirección lateral está incluida solo indirectamente a través de la dispersión lateral. Se asumen que las contribuciones a la dispersión por la mezcla del chorro no flotante y flotante son independientes una de otra, por lo que:

$$\frac{dB}{ds} = \left(\frac{dB}{ds} \right)_{nb} + \left(\frac{dB}{ds} \right)_b \quad (\text{A.68})$$

Donde los subíndices b y nb denotan los términos flotante y no flotante, respectivamente. La dispersión no flotante se encuentra con al ecuación (A.67), sin los términos flotantes.

$$\left(\frac{dB/ds}{dH/ds} \right)_{nb} = (B/H)(dQ/ds)_h / (dQ/ds)_v \quad (\text{A.69})$$

Donde $(dQ/ds)_h$ y $(dQ/ds)_v$ son las tasas de arrastre horizontal y vertical respectivamente. La tasa de dispersión no flotante es:

$$\left(\frac{dH}{ds} \right)_{nb} = \frac{SF_y \sin \theta + SF_x \cos \theta + (V \cos \theta - 2Q/\pi BH)(dQ/ds)}{-\left(Q^2/\pi BH \right) \left[(dQ/ds)_v / (dQ/ds)_h + 1 \right]} \quad (\text{A.70})$$

La dispersión debido a la flotación se asume como una función de la relación local del exceso de densidad, la profundidad de la pluma y la relación de aspecto, con lo cual se tiene

$$\left(\frac{dB}{ds} \right)_b = \sqrt{\frac{2}{\frac{B}{H} F^2 - 1}} \quad (\text{A.71})$$

Se nota que también existe una singularidad, pero como B/H es generalmente grande, esta singularidad no se encuentra en la mayoría de los problemas ingenieriles.

Las ecuaciones anteriores son suficientes para realizar una integración por pasos a lo largo de la pluma. A partir de las condiciones locales se calcula dQ/ds , cuando esta tasa es conocida, dT/ds , $d\theta/ds$

y dB/ds son calculados, con estos valores conocidos se calcula dH/ds . Después, estas derivadas son integradas a lo largo de la trayectoria para obtener los valores locales de X, Y, T, H, B, θ y Q .

Para empezar la integración en la zona desarrollada, donde el análisis anterior es válido, se deben calcular unas condiciones iniciales. Estas son determinadas por medio de un análisis simplificado en esta zona, asumiendo que la longitud de desarrollo está dada por la ecuación

$$S_i = 5.4 \left(\frac{A^2}{F_0} \right)^{1/3} \quad (\text{A.72})$$

Donde A es el área de descarga y F_0 es el número de Froude densimétrico en la descarga.

A.3 Modelos empíricos y de longitud de escala

A.3.1 Ambiente no estratificado

Las aguas del océano tienden, durante los meses del otoño y el inicio de la primavera, a mantenerse sin estratificar, lo cual permite que la pluma ascienda a la superficie. Si la estratificación es débil, el efluente no puede ser atrapado antes de salir a la superficie, en estos casos, las expresiones para flujo no estratificado deben ser utilizadas.

A.3.1.1 Dilución inicial

Para 90° , $0.1 \leq F \leq 100$

$$S_1 = 1.41 \cdot \frac{U \cdot H}{q} \cdot 0.58 \quad (\text{A.73})$$

Para 45° , $0.1 \leq F \leq 1$

$$S_1 = 1.41 \cdot \frac{U \cdot H}{q} \cdot (0.3653 \cdot F^{-0.185}) \quad (\text{A.74})$$

para 45° , $1 \leq F \leq 100$

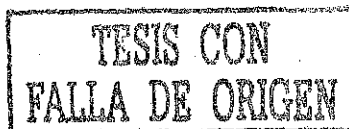
$$S_1 = 1.41 \cdot \frac{U \cdot H}{q} \cdot (0.3715 - 0.005 \cdot F) \quad (\text{A.75})$$

A.3.1.2 Longitud del campo cercano

La longitud de la región de mezcla inicial, para corrientes perpendiculares puede ser estimada con la siguiente relación, la cual es el mejor ajuste para la gráfica propuesta por Roberts (1979)

$$X_i = H \cdot (0.566 \cdot F + 3.389) \quad (\text{A.76})$$

Debido a la ausencia de relaciones más apropiadas para corrientes con incidencia de 45° y 0° , el cálculo de la longitud del campo cercano se realiza con la expresión (A.76).



A.3.1.3 Anchura de la pluma

El ancho de la pluma al final del campo cercano, w_α para corrientes con ángulo de incidencia de 90° , 45° y 0° se puede calcular con las expresiones correspondientes para ambiente linealmente estratificado, esto sin embargo puede subestimar w_α debido a que la dispersión que se produce en un ambiente no estratificado es mayor que la que se produce en un ambiente estratificado, Roberts 1989b.

A.3.1.4 Análisis de la dilución en la zona lejana, S_2 .

A.3.1.4.1 Ley de Richardson

Si se considera una descarga de una sustancia que es transportado por una corriente, esta descarga está sujeto a un fenómeno denominado advección, los remolinos que hacen parte de la corriente influyen en la ampliación, con respecto a su centro, de este parche, son aquellos que tiene un tamaño inferior al tamaño instantáneo de la mancha.

Como la descarga es cada vez se vuelve más grande, los remolinos que en un principio no influían en su acrecentamiento, por que eran mayores que el tamaño del parche, son ahora considerados, a medida que la mancha se hace más grande; cada vez hay mas remolinos que influyen en su advección.

El coeficiente de difusión, ε , es directamente proporcional al tamaño del parche, como el tamaño de este puede ser mas fácilmente visualizado en términos del área del parche que de la longitud de este, es razonable pensar que el coeficiente crece más rápido que el ancho L de la mancha. Una buena aproximación para la difusión en aguas abiertas es que su coeficiente crece a una potencia de $4/3$ de la longitud de la mancha, en la ley de Richardson se expresa esta relación con (A.77):

$$\varepsilon = \alpha L^{4/3} \quad (A.77)$$

En la expresión (A.77) α es un parámetro que varía de acuerdo a las características del oleaje, la presencia o ausencia de fronteras físicas, como es la costa, Koh y Brooks (1975), indican que el rango de valores que toma este parámetro esta entre $0.0015-0.019 \text{ cm}^{2/3}/\text{s}$, Pearson sugiere un valor constate de $0.01 \text{ cm}^{2/3}/\text{s}$.

En los casos donde la descarga se realiza en lugares muy encerrados, el coeficiente de dispersión crece a la primera potencia del ancho de la mancha de contaminante.

