



Artículo

<http://www.cioh.org.co> <http://www.dimar.mil.co>

HIDRODINÁMICA Y DISTRIBUCIÓN DE COLIFORMES EN EL GOLFO DE URABÁ

Serguei LONIN¹, Jairo Guillermo VÁSQUEZ A.²

¹ Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena de Indias, E-mail: slonin@costa.net.co.

² Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá, Apartadó Antioquia, E-mail: corpoura@edatel.net.co.

Resumen - Los coliformes fecales se observaron en las campañas de CORPOURABÁ para distintas épocas del año en zonas del Golfo de Urabá, relativamente lejanas de las posibles fuentes costeras, teniendo en cuenta que el tiempo de degradación de la microflora patógena es de orden de horas. El objetivo de este trabajo fue determinar la extensión de las zonas de contaminación por coliformes, originadas por las principales fuentes puntuales en los ríos y zonas urbanas. Con el fin de estudiar la dinámica de los coliformes en el golfo, fue aplicado el modelo hidrodinámico ECOMSED. El transporte de la sustancia fue simulado tanto en sistema lagrangeano, como euleriano. Con lo primero, fue identificado el alcance hasta donde se dispersa la sustancia de cada fuente particular; con lo segundo fue posible establecer los patrones resultantes de contaminación bajo distintas condiciones climáticas del año.

Abstract - Fecal coli forms were observed by CORPOURABÁ in distinct seasons of the year in the Golfo de Urabá, in places relatively far from possible costal sources, having into consideration the degradation rate for pathogenic micro flora that is order of hours. The objective of this paper was to determinate the scales of coli forms pollution extension with the origin in point sources in the principal rivers and urban zone. With the aim of studying coli form dynamics in the gulf, a hydrodynamic model ECOMSED was applied. The substance transport was simulated as well in lagrangian as in eulerian systems. With the first one, spatial dispersion from each one of the sources was identified; with the second, resulted contamination patterns were established for different climate conditions.

Palabras clave - Microflora patógena, coliformes, modelo hidrodinámico, Golfo de Urabá.

Key words - Pathogenic micro flora, coli forms, hydrodynamic model, Golfo de Urabá.

INTRODUCCIÓN

El Golfo de Urabá está altamente contaminado, específicamente por efluentes costeros urbanos y los ríos que allí desembocan. Debido a que la presencia de los ríos genera una capa superficial endulzada de pocos metros, la contaminación se propaga en el nivel superficial, sujeto a la influencia de corrientes de deriva.

En general, la circulación del golfo se forma gracias a varios procesos hidrometeorológicos. Los vientos, oleaje, descarga de los ríos, influencia oceánica, estratificación salina y mareas son los principales factores, considerados en la circulación del golfo. La circulación de agua en la capa superior depende en forma pronunciada del caudal de aguas dulces, principalmente del río Atrato, afectando la difusión turbulenta y la

redistribución de impulso en la vertical por el trabajo contra las fuerzas de boyancia; en la capa inferior la dinámica se debe a la variabilidad de la corriente oceánica Panamá-Colombia y el flujo de compensación, formado por el viento en la capa superficial. La distribución de los sólidos finos, calculada por el modelo (Lonin, sin publicar), tiene una estratificación inversa, típica para los sedimentos finos del origen lejano (“*wash-load transport*”). Un comportamiento semejante de los limos fue encontrado en la Bahía de Cartagena (Lonin *et al.*, 2004).

Sobre la contaminación en el Golfo de Urabá testifican las mediciones que realiza CORPOURABÁ para las dos épocas del año. Dentro de los elementos monitoreados, uno de importancia para la salud humana es la presencia de la microflora patógena en las aguas del golfo, generalmente, los coliformes fecales y totales. Las mediciones de campo están usualmente restringidas por el tiempo, asincronismo de observaciones en distintas estaciones, por tanto, con la influencia variable de distintos factores del medio ambiente que no permiten identificar claramente el origen de la contaminación, observada en distancias grandes de los posibles efluentes de la materia.

Esto fue el motivo para generar este trabajo, cuyo principal objetivo fue la identificación de las fuentes de contaminación por coliformes fecales en el Golfo de Urabá. La herramienta aplicada fue un modelo hidrodinámico y de transporte, ECOMSED (*HydroQual, Inc.*), la versión costera del modelo POM (*Princeton Ocean Model*, Blumberg & Mellor, 1987).

El trabajo está organizado de la siguiente manera: se inicia describiendo la zona de estudio, luego se presentan los datos disponibles y la metodología - una breve descripción del modelo utilizado y la formulación de los experimentos numéricos. Los resultados a continuación tratan tanto de los patrones hidrodinámicos, calculados para el golfo, como propiamente lo de la dinámica y distribución espacial de los coliformes fecales.

ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de Urabá se localiza en la parte más meridional del Caribe, definido por las

coordenadas extremas de 7° y 8°40' N y 76° y 77°23' W. Tiene una extensión aproximada de 1800 km². La presencia del delta del río Atrato delimita dos áreas diferentes al interior del golfo. Se distingue la zona norte con una profundidad promedio de 40 m, sujeta primordialmente a las condiciones de mar abierto (Figura 1). Por otro lado se tiene la porción interior, localizada al sur, que recibe el nombre de Bahía Colombia. Allí las profundidades promedio son de 20 m. Los aportes fluviales tienen especial relevancia a la hora de definir la dinámica de este sector del golfo (POT Municipio de Turbo, 2000).

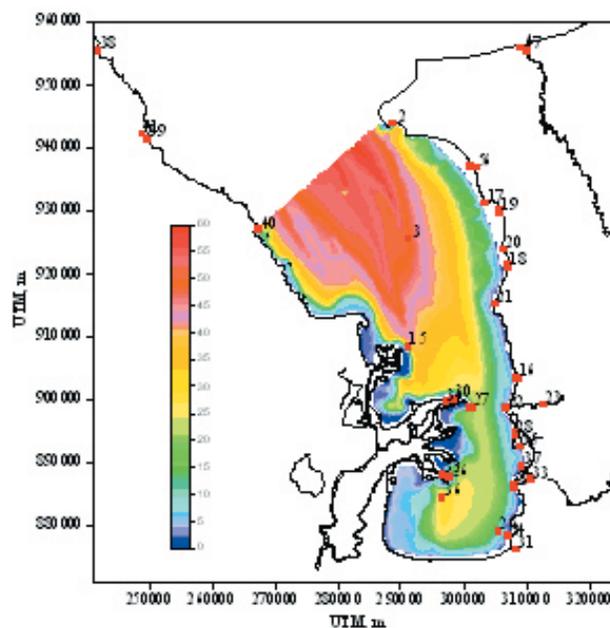


Figura 1. Batimetría del Golfo de Urabá (en metros) en el dominio del modelo y los puntos de mediciones de coliformes fecales, correspondientes a la Tabla 3 (algunos de los puntos de la Tabla 3 se encuentran ubicados fuera de los límites del dominio).

Distintos procesos físicos participan en la conformación de las características básicas de las distintas zonas del golfo, las áreas litorales y los estuarios. El patrón de clima es debido a la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), cuya presencia hace que la época de lluvias predomina en el año. Según Cotero y Gómez (1996), los meses menos lluviosos son enero, febrero y marzo, con una transición en diciembre entre la época húmeda y seca. El resto del año (abril-noviembre) la precipitación es alta (entre 200 y 300 mm por mes; estación río Turbo) con una suma anual alrededor de 2200 mm.

Las temperaturas de aire medias mensuales en el golfo son de 26.3° (Sánchez, 1990); la humedad relativa varía entre 79 y 90%. Durante el día la humedad varía desde 95% en la mañana, 70% al medio día y 85% en la tarde (O.E.A., 1978).

INFORMACIÓN DISPONIBLE

El trabajo de Cotero y Gómez (1996) presenta un análisis climatológico sobre los vientos en la región. De acuerdo con los datos del IDEAM para la estación de Turbo, los vientos alisios del norte están soplando durante los meses enero-marzo y una parte del mes de diciembre, mientras que durante la época de lluvias (abril-noviembre), los vientos provienen del sur. La rosa de vientos, recopilada por Arsitizábal *et al.* (1990) muestra estas dos direcciones predominantes con 30% de tiempos de ocurrencia de los vientos del norte en comparación con 22 % de ocurrencia de los vientos del sur. Las demás direcciones (noroeste, oeste y suroeste) se presentan en menor de 10% de casos para cada una; los vientos de noreste, este y sureste fueron registrados en menos de 2% de los casos.

Por lo tanto, se pueden establecer dos principales patrones de dirección: N y S. La intensidad de los vientos para estos patrones está marcando una diferencia: los vientos del N presentan las velocidades entre 5.5 y 7.9 m s⁻¹ en más de 8% de los casos, mientras que para los vientos del S, estas velocidades ocurren en menos de 1% de tiempo; las velocidades mayores de 8 m s⁻¹ son escasas para el patrón del S, mientras que para el N presentan por lo menos un 4% de tiempo.

El Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Turbo, (2000) es uno de los documentos más completos que hay sobre la descripción físico-geográfica de la zona de estudio. Particularmente, sobre los vientos el documento menciona que los alisios se presentan durante los meses enero-marzo con velocidades de 12-14 km h⁻¹ (3-4 m s⁻¹), mientras que los vientos del sur soplan el resto del año con las velocidades no mayores de 8 km h⁻¹ (< 2.2 m s⁻¹) en promedio. Los máximos de las velocidades para los vientos del sur nunca superan 15 km h⁻¹ (4.2 m s⁻¹). Para los vientos alisios fueron registrados casos cuando los vientos de 25 km h⁻¹ (7 m s⁻¹) soplaban hasta

de 24 horas continuas con un alcance máximo de 35 km h⁻¹ (10 m s⁻¹).

El trabajo de Benavides (2000) cita la información sobre los vientos analizados para los años 1978-1981 por Aguilera (1988), donde se mencionan los tres patrones de vientos en la región, dependiendo de las épocas climáticas. Estos tres tipos son:

- Vientos del Norte (N) y Noreste (NE) correspondientes a los meses entre enero y abril;
- Vientos variables del Sur (S) para los meses entre mayo y noviembre y
- Vientos de transición N-S en el mes de diciembre.

Según Chevillot y Molina (1989), la velocidad media anual de los vientos en el golfo es de 4 m s⁻¹; la mínima es de 1.8 m s⁻¹ y la máxima es de 9.4 m s⁻¹ y corresponde al mes de febrero.

De acuerdo con toda esta información recopilada y nuestro propio análisis de los datos del IDEAM, establecemos dos patrones principales de vientos en los cálculos: para los vientos del N la velocidad se toma igual a 8.9 m s⁻¹, mientras que para los vientos del S ella es de 3.0 m s⁻¹.

El trabajo CIOH (1991a) se trata del estudio de la circulación de las aguas del Golfo de Urabá aplicando la percepción remota. Con base en el análisis de las imágenes SPOT, a través del comportamiento espacial de los patrones de turbidez por primera vez fue definido el esquema de la circulación general del golfo y de la deriva litoral. En general, la circulación del agua en el Golfo es un producto de efectos de viento, estratificación salina, influencia externa y, en menor dimensión, la marea (Lonin, sin publicar). La distribución de los sólidos finos, provenientes de los ríos está sujeta a esta circulación. Sin embargo, la deriva litoral, las corrientes costeras, son de otra naturaleza distinta, son inducidas por olas. Por lo tanto, el sentido de transporte litoral está bien marcado por la dirección de las flechas, como ejemplo, la flecha Yarumal y el espigón de Punta de Las Vacas.

En el informe del CIOH (1993) se encuentra el análisis de los datos del crucero Urabá-II, realizado en el período de febrero-marzo de

1993 como una continuación del monitoreo anterior (Urabá-I, julio 1992). Se encuentra un registro de datos medidos de viento entre 27 de febrero y 5 de marzo de 1993, desafortunadamente incomparable con los datos de IDEAM por la ausencia de la información entre estas fechas. Los datos de temperatura y salinidad graficados en la superficie y fondo del golfo están dando una idea sobre la hidrología del área. Las corrientes tomadas durante 24 horas en tres estaciones a 3 m de profundidad muestran el comportamiento puntual del movimiento de aguas; un concepto general sobre la circulación del golfo se hace en este trabajo con base en el análisis de los campos termohalinos. Se menciona una influencia de la corriente Darién en la capa inferior del golfo, entrando en la parte noroeste y saliendo en noreste. En términos generales, nuestros cálculos están afirmando las conclusiones empíricas, hechas en CIOH (1993). El planteamiento de los experimentos numéricos con el modelo ECOMSED fue realizado con base en esta información primaria.

Las mareas en el Golfo de Urabá no juegan un papel protagonista en la circulación general, sin embargo, tienen influencia en el régimen de flujo en las desembocaduras de los ríos de la región y la dinámica de sedimentos a lo largo de las costas. Según Franco (1992), la marea en la región es de carácter semi-diurna con pleamares cada 11.5 horas. Los datos registrados en el mareógrafo instalado en el municipio Turbo muestran una oscilación entre 1.03 y 0.57 m con respecto a un datum (de Panamá) de 0.89 m. En las corridas del modelo nosotros establecemos las armónicas principales de la marea de acuerdo a esta información:

Tabla 1. Armónicas principales de la marea, tenidas en cuenta en las simulaciones del Golfo de Urabá.

Armónicas	S ₂	M ₂	N ₂	K ₁	P ₁	O ₁
Amplitud, m	0.02	0.08	0.02	0.09	0.03	0.06
Fase, grad.	250	160	230	170	164	324

El informe del CIOH (1991b) establece las características descriptivas oceanográficas y climatológicas, basadas en el Crucero Geológico "Golfo de Urabá", octubre de 1988 y febrero-marzo de 1989. Las mediciones de salinidad y temperatura permitieron establecer que la capa de mezcla varía estacionalmente

entre 3 m en la época húmeda (mes de octubre) hasta 5 m en la época seca (febrero). También se menciona que la turbidez en profundidad es muy débil, lo que coincide con las mediciones obtenidas dentro del proyecto "Unidad Ambiental Costera Darién" de CORPOURABÁ e INVEMAR (año 2004).

De acuerdo con el POT Municipio de Turbo (2000), las corrientes regionales del Mar Caribe establecen el ámbito global para el estudio de las circulaciones al interior del golfo. La corriente del Caribe asociada con los vientos alisios avanza desde el este y cuando alcanza la península de Yucatán se bifurca en dos ramales, uno de los cuales se dirige al sur y sigue el contorno interior del Caribe dictado por el Istmo de Panamá, dirigiéndose luego al noreste. Esta es la llamada contracorriente de Panamá, cuyas velocidades se estiman entre 1 y 2 km h⁻¹. En los períodos de octubre y noviembre la corriente se alcanza a manifestar hasta en la Guajira. "La corriente penetra al golfo por su costado occidental originando un remolino dextral en Bahía Colombia y continúa su rumbo hacia el norte por el costado oriental del mismo para seguir paralela a la costa colombiana" (CIOH, 1993). Se define una circulación general en sentido norte-sur en el sector oeste del golfo, la cual se desvía a la altura de Bahía Colombia a una dirección sur-norte sobre el costado este de la costa.

El campo de salinidad presenta variaciones significativas en los planos horizontal y vertical. La acción de los vientos alisios parece ser elemento fundamental en tales patrones. Cuando penetran estos vientos, se presenta una zona de aguas dulces superficiales que se extiende desde la línea Boca Tarena-Punta Caimán hasta el extremo sur de la Bahía Colombia, donde la salinidad es inferior a 5. La segunda zona se extiende desde la línea ya mencionada hasta la entrada al golfo, definida por la línea entre Cabo Tiburón y Punta Caribana. Hay aquí un gradiente de salinidad significativo, con valores extremos de 10 en el sur hasta 30 a la entrada del golfo. Este panorama de las aguas superficiales permanece casi invariable en los primeros metros de la columna de agua. Los gradientes verticales en la salinidad no superan el 2 en los primeros tres metros de profundidad. A los 20 m de profundidad la distribución horizontal de la salinidad presenta una uniformidad propia de las aguas de procedencia marina. Se tienen valores extremos de 36.6 en la zona norte hasta

de 36.4 en la zona sur. Esto supone el ingreso de un ramal de la contracorriente de Panamá al interior del golfo, y una estratificación vertical muy definida.

La distribución espacial de salinidad medida para la época húmeda en la capa superficial se muestra en la Figura 2. Estos datos no sirven directamente para la modelación, debido a que son asincrónicos y presentan ciertas deficiencias por esta razón. En la capa superficial (0-4 metros), los eventos de lluvias durante los cinco

días de la campaña del proyecto “Unidad Ambiental Costera Darién” “contaminaron” los datos, varias estaciones del crucero aparecen con lentes de agua endulzada, aislada de las bocas de los ríos. Sin embargo, a partir de 5 metros de profundidad, la distribución de la salinidad muestra su patrón general, descrito arriba: una influencia obvia de la corriente de Darién entrante en la parte occidental (mayor salinidad) y la recirculación de las aguas del golfo en el costado oriental (salida de aguas con menor salinidad en la capa inferior).

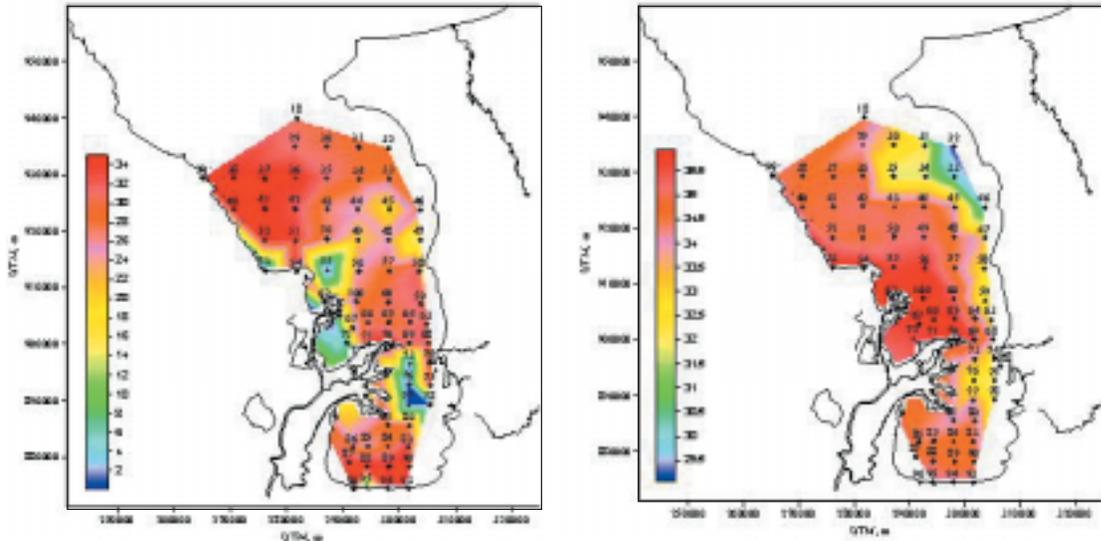


Figura 2. Salinidad en la superficie (izquierda) y en la profundidad de 5 m (derecha) de acuerdo con las estaciones hidrológicas de INVEMAR-CORPOURABA (puntos), realizadas durante la campaña de la época húmeda (21-25 de octubre del año 2004).

Debido a que las condiciones iniciales en el modelo “se olvidan” durante la evolución de los campos hidrodinámicos, el principal interés en estos datos es utilizarlos en calidad de las condiciones de contorno a lo largo de la frontera líquida (norte) del dominio de cálculo. Esto requiere una debida filtración y suavización de la información cruda.

Con orientación general hacia el norte, la cuenca del río Atrato está definida entre la cordillera Occidental y la serranía del Baudó. El río Atrato tiene una longitud de 670 Km y su cuenca un área de 35,700 km². La escorrentía del río Atrato domina los aportes hídricos al Golfo de Urabá con caudales promedios multianuales de 4,500 m³ s⁻¹, alimentando también el grupo de ciénagas presentes en su llanura de inundación que actúan como sumideros de CO₂. Está localizado en una de las zonas más lluviosas del planeta como lo es el Chocó biogeográfico (POT Municipio de Turbo, 2000).

En el estudio de Zapata (1998) se hace una evaluación de zonas críticas de erosión en el litoral Caribe antioqueño. En el análisis de la información climatológica, en este trabajo se cita la variación del caudal del río Turbo (datos de IDEAM en la estación El Dos), mencionando los valores mensuales de 3.66 m³s⁻¹ (multianual) para un período de registro entre 1966 y 1993. Según Zapata (1998), el caudal del río Turbo varía alrededor de este valor con un mínimo multianual de 0.1-0.4 m³s⁻¹ (en la época seca la boca está tapada por los sedimentos) y un máximo de 10-20 m³s⁻¹, presentando los extremos hasta de 60-70 y 100 m³s⁻¹. Debido a que las mediciones de caudales son esporádicas, se puede aceptar que estos datos no representan los casos poco frecuentes de escorrentías durante los eventos cortos de lluvias fuertes.

La Tabla 2 refleja los caudales de los ríos que desembocan al golfo a lo largo de toda la costa antioqueña en los municipios de Turbo y

Necoclí. Los datos son valores puntuales tomados en diferentes campañas de CORPOURABÁ, entre la desembocadura y el primer kilómetro de cada fuente. Por efecto de la sedimentación fluvio-marina en la desembocadura de la mayoría de ríos, durante la época seca se hace imposible la medición de caudales, por ello que todos los registros

se realicen entre los meses de mayo y noviembre.

Cada afluente en su desembocadura se convierte en punto de interés por ser la puerta de entrada de diferentes cargas y tipos de contaminantes y por ser sitio de difusión y dispersión hacia las aguas marinas.

Tabla 2. Caudales de afluentes al Golfo de Urabá.

AFLUENTE	CAUDAL m ³ s ⁻¹
Río Currulao	2.13
Río Guadualito	2.3
Río León	40.0
Río Suriquí	20.0
Río Turbo	5.5
Río Caimán Nuevo	3.7
Río Caimán Viejo	4.0
Río Bobal	3.5
Río Necoclí	3.5
Río Atrato:	
Brazo Leoncito	350
Brazo Coquitos	700
Brazo Matuntugo	1100
Brazo El Roto	2300
Brazo Tarena	300

En el marco de la investigación sobre la calidad ambiental marina y en particular en la aplicación del rango e índice de calidad ambiental marino (ICAm) por contaminación con coliformes fecales (*E. coli*), la red de puntos de monitoreo se ha diseñado sobre la identificación de los sitios de entrada de los contaminantes; la toma de muestras se realiza siguiendo las técnicas normalizadas del Estándar método. El Golfo de Urabá es un gran receptor de todo tipo de contaminante que procede del continente; característicamente los altos contenidos de coliformes proceden desde los centros poblados costeros, toda vez que los sistemas de tratamiento de aguas residuales son en parte inadecuados y poco funcionales y por la actividad ganadera a través de afluentes y efluentes. La aplicación de índices y la posibilidad de dimensionar su impacto con la aplicación del modelo, permitirá a las

autoridades ambientales la formulación y adopción de políticas que contribuyan a la mitigación de impactos sobre el medio ambiente y la salud humana.

Con los resultados obtenidos a lo largo de los cinco (5) años de monitoreo, se destacan valores máximos de concentración de coliformes fecales encontrados en las aguas del río León, donde se obtuvieron valores de 260000 y 230000 NMP/100 ml durante las campañas de 2004 y 2005 en la época de invierno y de 50000 y 30000 NMP/100 ml en los ríos Currulao y Turbo durante la campaña de 2004 en época de verano (Tabla 3).

Los registros de la Tabla 3 indican que en la época de verano el 28.4% y en la época de invierno el 37% de las estaciones monitoreadas sobrepasan los límites máximo permisibles por la legislación para aguas de contacto primario.

Tabla 3. Concentración puntual de coliformes fecales (NMP/100ml) obtenida en estaciones de monitoreo del Golfo de Urabá.

NOMBRE PUNTO*	ÉPOCA VERANO					ÉPOCA INVIERNO				
	2001	2002	2003	2004	2005	2001	2002	2003	2004	2005
1. Playa Arboletes	2780	2300	<200	70	200	16000	14000	40	330	150
2. Ensenada Rionegro	20	150	20	20		0	220	20	20	230
3. Centro Golfo de Urabá	NEG	NEG	20	40		170	<20	<20	40	
4. Desembocadura río Mulatos	1400	15000	<2000	40	1700	270	1500	330	3400	1300000
5. Desembocadura río Necoclí	20	4300	400	270		540	800	5000	140	
6. Km arriba río Necoclí	<2000	2300	<200	140		220	2300	700	80	
7. Km arriba río Mulatos	7900	21000	800	20		2800	2100	120	28000	
8. Desembocadura río San Juan		400	70	130	40		2000	11000	14000	230
9. Km arriba río San Juan		15000	200	140			8000	1100	17000	
10. Desembocadura río Volcán			110000	340	2200			90000	330	750
11. Desembocadura río Hobo			40	110	40			800	1700	90
12. Playa Úveros			90	140	80			5000	90	430
13. Desembocadura río Damaquiel			200	2200	270			2400		80000
14. Km arriba río Damaquiel			-	270				500		
15. Golfo de Urabá 21	20	230	400	40		310	200	700	40	
16. Playa la Martina	<20		220	500	170	1700	220	20	110	90
17. Playa de Necoclí	490	2300	330	40	1700	17	110	300	40	230
18. Playa Totumo	50	-	2800	40	1300	94	1100	1700	2200	40
19. Desembocadura río Bobal			17000	220				5000	3000	
20. Desembocadura río Caimán Viejo			110	40				220	3000	
21. Desembocadura río Caimán Nuevo	1300		13000	40	110			3000	40	40
22. Desembocadura río Turbo	330		<2000	140	170			2100	8000	90
23. Km arriba río Turbo			30000	2200	3000			2100	2600	1500
24. Desembocadura río León	140	700	70	330	28000	3400	-	2300	33000	230000
25. Km afuera río León	1090	210	40	20	2200	0	-	9000	340	40
26. Desembocadura río Leoncito	200	900	200	20		110	140	400	80	
27. Golfo de Urabá 22	<20	380	800	40		130	NEG	<200	20	
28. Playa de Turbo	200	-	2800	210	170	130	120	230	400	<30
29. Desembocadura Río Currulao	200	9300	50000	80	330	790	210	7000	22000	90000
30. Desembocadura río Atrato-Matuntugo	200	1500	1400	20	110	50	170	<200	40	90
31. Km arriba río León	340	24000	1400	9000	3300	16000	-	1300	260000	230
32. Km arriba río Leoncito	<20	1500	200	40		110	1090	<30	80	
33. Km arriba río Currulao	3400	-	14000	270		24000	600	90000	1700	
34. Km arriba río Atrato-matuntugo	<200	700	4000	20	110	130	270	70	130	
35. Muelle Armada		24000	<200	330	260		170	40	330	
36. Km afuera.de Leoncito-B.Colombia		40	-	20	20		110	40	20	90
37. Desembocadura río Guadualito	20		13000	40	330			3500	1300	90
38. Playa Capurganá	NEG		260	70		0	50	500	170	280
39. Desembocadura Río Acandí	80		28000	140		34		2400	20	430000
40. Playa Triganá	330		70	20		27		20	20	90
41. Km arriba río Acandí	140		400	110		220		3000	70	230

* - Los números de los puntos corresponden a los demostrados en la Figura 1.

METODOLOGÍA

El modelo ECOMSED de HydroQual Inc. es un modelo basado en POM (Blumberg & Mellor, 1987) con bloques adicionales de oleaje, transporte de sustancias y sedimentología. El modelo está empleando las ecuaciones primitivas de hidrodinámica con la superficie libre, la termodinámica completa y la clausura del nivel 2.5 de los momentos turbulentos de Reynolds. El transporte de sustancias se permite simular tanto en las coordenadas lagrangeanas, como eulerianas.

El dominio de cálculo para el Golfo de Urabá fue seleccionado dentro de los límites, mostrados en la Figura 1. La malla curvilínea de 80 por 160 nodos cubre este espacio con una resolución que varía entre 212 y 900 m con un promedio de 350 m en el sentido zonal y 422 m en el meridional. La malla tiene una variación espacial de la orientación de los ejes entre 21 y 45° con la restricción de la ortogonalidad. La desviación de ortogonalidad no supera 0.5° en todo el dominio. La profundidad es variable entre 0.5m (con respecto al nivel medio del mar)

y 60.3 m con un promedio de 28.5m y con 11 niveles de la coordenada “sigma”, uniformemente distribuidos en la vertical.

La turbulencia en horizontal (A_M) se calculó por la fórmula de Smagorinskiy con un patrón de la parametrización en la sub-escala igual a $0.16m^2s^{-1}$, lo que corresponde a 350 m de la resolución Δ de acuerdo con las fórmulas de Okubo $A_M = 0.0103\Delta^{1.15}$ y de Ozmidov $A_M = C\varepsilon^{1/3}\Delta^{4/3}$, donde $C = 0.01$ y ε es la tasa de disipación de la energía cinética de turbulencia, asumida ser igual a $2.5 \cdot 10^{-3} m^2 s^{-3}$.

El sistema fue forzado desde el estado de reposo en el régimen “diagnóstico” durante una hora, luego re-estableciendo el régimen de “pronóstico” (evolución de los campos termodinámicos según la clasificación de los

modelos hidrodinámicos). El campo de temperatura y salinidad fueron establecidos en forma homogénea de un solo perfil como demuestra la Tabla 4. La razón de no utilizar los datos de la campaña, mencionados arriba, se demostró en la Figura 2: los campos de estos parámetros fueron asincrónicos y los gradientes bruscos pueden causar la inestabilidad numérica al principio de cálculo. Aunque la distribución inicial dada por la Tabla 4 no es real, el mismo modelo, forzado por las condiciones de contorno, entregará estos campos sincrónicos calculados. Los datos de la campaña si fueron utilizados en las condiciones de contorno en la frontera líquida en el norte del dominio cuando el flujo es entrante. Cuando el flujo es saliente, se empleó la condición de radiación de Sommerfeld.

Tabla 4. Perfiles de temperatura y salinidad establecidos en los niveles estándares del modelo en calidad de las condiciones iniciales homogéneas.

Profundidad, m	0	1	2	3	4	5	7	10	15	20	25	30	40	50	61
Temperatura, ° C	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.0	27.7	27.7
Salinidad	32.6	32.6	32.7	33.1	34.2	34.6	34.9	35.4	35.7	36.1	36.1	36.1	36.2	36.3	36.3

Los datos de viento y de la marea fueron establecidos en el apartado anterior. La simulación de la dinámica de coliformes fue efectuada para las dos épocas del año (seca y húmeda), tomando los datos de concentraciones máximas por años de acuerdo con la Tabla 3.

El contenido de esta tabla generalmente muestra la concentración de coliformes fecales en cercanías de las posibles fuentes (desembocaduras de los ríos) o en las zonas relativamente lejanas de ellas. En el presente estudio nosotros asumimos que la sustancia proviene desde los ríos y tratamos de establecer su distribución espacial, variando los vientos dependiendo de la época climática y conservando los caudales de los ríos constantes de acuerdo con la Tabla 2. La última simplificación es debido a la ausencia de datos de caudales, distribuidos en el año y además para varios brazos, específicamente del río Atrato, para el cual dicha suposición es más débil por una gran variabilidad del caudal durante el año. Los ríos menos caudalosos se cierran durante la época seca, pero el aporte de agua de ellos es poco significativo y durante la época húmeda desde

el punto de vista del balance hídrico del golfo y su contribución a la formación de la boyancia como un factor importante en la hidrodinámica.

Según la Tabla 3, la presencia de coliformes se registró, por ejemplo, en el punto 3 de la Figura 1 (centro de la parte norte del golfo), aunque la tasa de mortalidad de coliformes fecales varía entre 1 y 11 horas en las condiciones de luz y sombra, respectivamente, según varias investigaciones, pero en Tuchkovenko y Rondón (2002) se menciona (para el caso de la Bahía de Cartagena) una tasa mucho más restringida entre 1 y 4 horas. El origen de la sustancia se establece con base en las simulaciones. Con este fin se estudió primero la potencialidad de distintas fuentes en los ríos, inyectando los coliformes en sus desembocaduras y efectuando el cálculo durante el tiempo no mayor de 12 horas, mientras que este proceso tiene sentido, pero, de todas formas, por encima del valor estimado en la referencia citada. Estos cálculos fueron iniciados después del período de estabilización de modelo, controlado por el comportamiento de la energía cinética (Figura 3).

Los campos eulerianos de la distribución de la sustancia fueron obtenidos luego. En estos cálculos fue simulada la dinámica de la sustancia, comparando los casos cuando la tasa de degradación es infinita e igual a 4 horas para estimar la influencia del proceso bioquímico en la distribución espacial. La

última información permite obtener los campos sincronizados de coliformes, lo que usualmente es imposible a través de las mediciones de campo. Una consideración sobre el uso de los datos en los modelos se encuentra en la discusión.

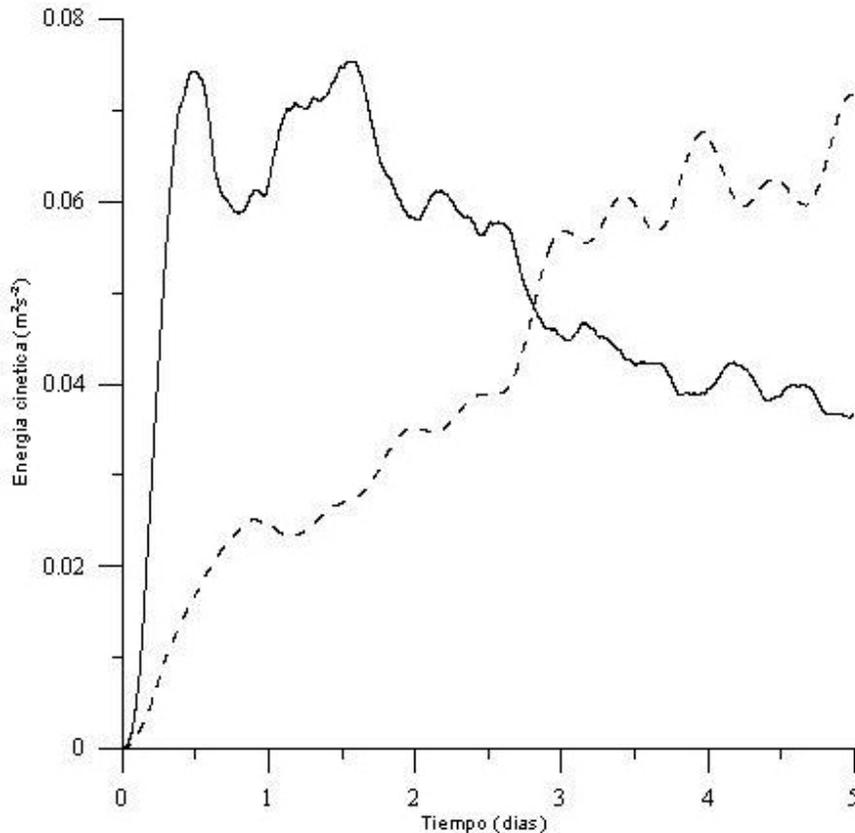


Figura 3. Comportamiento de la energía cinética específica, integrada en la superficie del mar en el arranque frío del modelo para la época seca (línea continua) y húmeda (punteada) del año climatológico.

RESULTADOS

Los campos de corrientes para las dos épocas climáticas se presentan en la Figura 4. Un interés particular tiene la circulación en la zona deltaica del río Atrato. Durante el año, no solo el caudal del río varía, sino también la dirección de la pluma de agua endulzada depende de la dirección predominante del viento.

Durante la época seca los vientos del norte dirigen la pluma hacia el sur, acumulando el agua salobre en la Bahía Colombia; la parte superior entre cero y cinco metros es agua endulzada que igualmente está confinada por acción del viento, como se observa en la Figura

5, mientras que en la época húmeda del año la pluma se distribuye en la dirección de los brazos con una predominancia de la dirección del norte. Supuestamente, ambos regímenes del viento están causando un flujo de compensación de agua que se forma en las capas inferiores, usualmente debajo de la pycnoclina, cuya dirección es contraria, compensando el déficit de agua en la Bahía Colombia durante la época húmeda (Figura 4b) y eliminando su exceso en la época seca (Figura 4a). La intensidad de corrientes superficiales es de orden de 50 cm s^{-1} alcanzando más de 1.5 m s^{-1} en las desembocaduras de los ríos; en las capas inferiores la intensidad usualmente disminuye hasta de $10\text{-}30 \text{ cm s}^{-1}$.

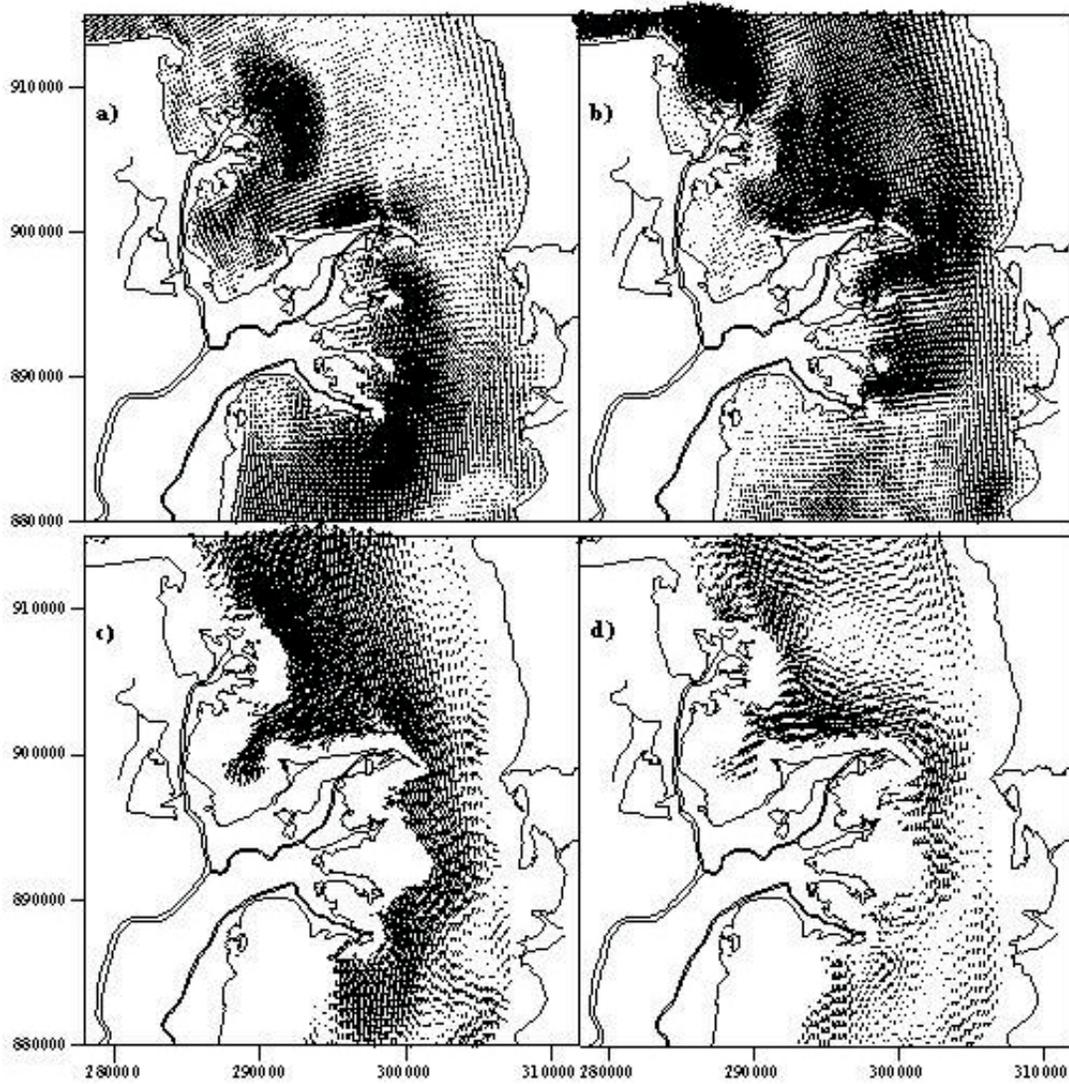


Figura 4. Patrones de corrientes para la época seca (a, c) y húmeda (b, d) en la superficie (a, b) y profundidad de 10 m (c, d).

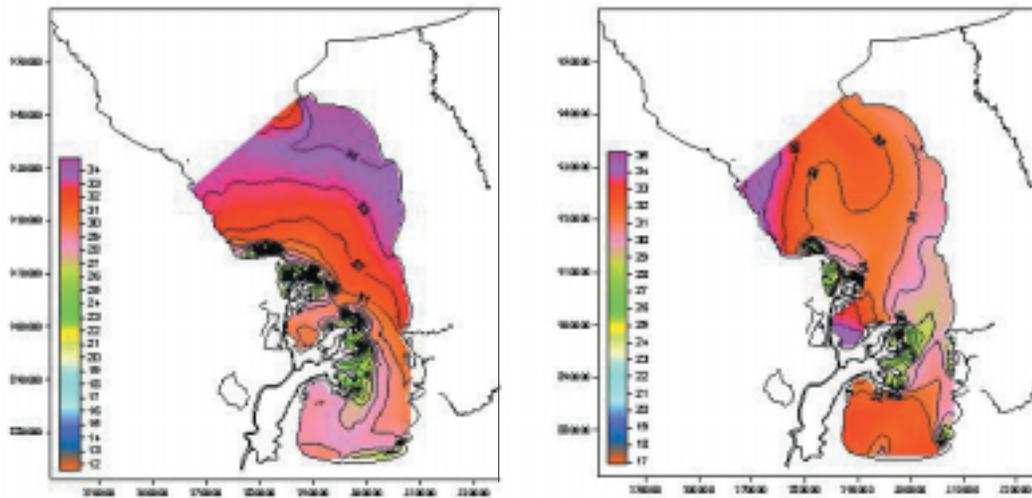


Figura 5. Patrones de salinidad en 5 m de profundidad para la época seca (izquierda) y húmeda (derecha).

La Figura 5 implícitamente muestra también el carácter de la circulación en la capa sub-superficial: durante la época húmeda del año la salinidad es mayor en la entrada al golfo en su costado occidental, lo que procede en estos resultados desde los datos de la campaña, mencionada arriba, y corresponde a las condiciones de la época húmeda. Desafortunadamente, en este estudio no fue posible utilizar un patrón característico en la frontera para la época seca, así que la Figura 5 (izquierda) demuestra cómo el modelo pretende alterar las condiciones de contorno, especificadas en la entrada del flujo de agua. Para la simulación de distribución de los coliformes, como fue descrito anteriormente, fueron aplicados los trazadores lagrangeanos, inyectados en las desembocaduras de los ríos y cuyas trayectorias se demuestran en la Figura 6. La duración del experimento no

superó 12 horas, considerando que la degradación de esta sustancia es más rápida. Por lo tanto, la Figura 6 permite estimar el alcance máximo de los coliformes en el golfo. Aunque no todas las fuentes posibles fueron tenidas en cuenta, se observa que durante la época seca, la sustancia, proveniente de las fuentes listadas en la misma figura, se concentra generalmente dentro de Bahía Colombia, mientras que para la época húmeda se desplaza hacia el norte en distancias significativas. Aunque la simulación de coliformes en este experimento fue en tres dimensiones, es decir, las partículas tenían libertad de desplazarse en la vertical, la boyancia, formada por las aguas dulces, limitaba el movimiento vertical de los coliformes, así que, estadísticamente, la mayoría se propagó dentro de la capa superficial hacia la dirección de la circulación de aguas endulzadas.

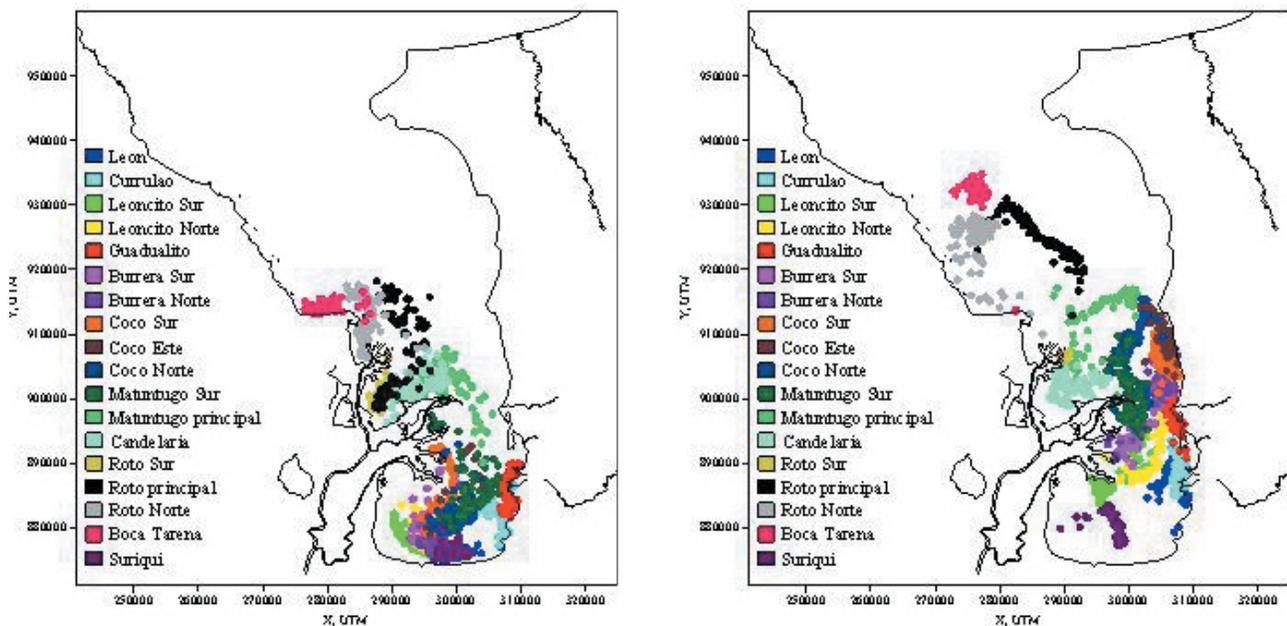


Figura 6. Posición de trazadores durante las 12 horas después de su inyección en las fuentes, imitando el desplazamiento de los coliformes en la época seca (izquierda) y húmeda (derecha).

Tomando como una escala característica de desplazamiento de las partículas de cada fuente la distancia de 10 km, resulta que la velocidad correspondiente de corrientes para este caso es de 23 cm s^{-1} , aproximadamente. Aparentemente, el análisis de estos resultados muestra que hay que esperar una dispersión de sustancia en el golfo en órdenes de 10-25 km desde el lugar de su origen. Esta conclusión es cierta siempre y cuando la sustancia no es conservativa, como el caso de coliformes.

El siguiente experimento, mostrado en la Figura 7, demuestra la importancia de los procesos químico-biológicos de mortalidad de coliformes. Se simuló un caso hipotético (para cada época del año), cuando la tasa de mortalidad de coliformes fue especificada igual a infinito; el otro caso (caso real) correspondió a una tasa restringida en 4 horas (6 días^{-1}). Los resultados mostrados en la Figura 7 testifican una fuerte limitación de la zona de influencia de cada fuente, gracias a los procesos de mortalidad de coliformes.

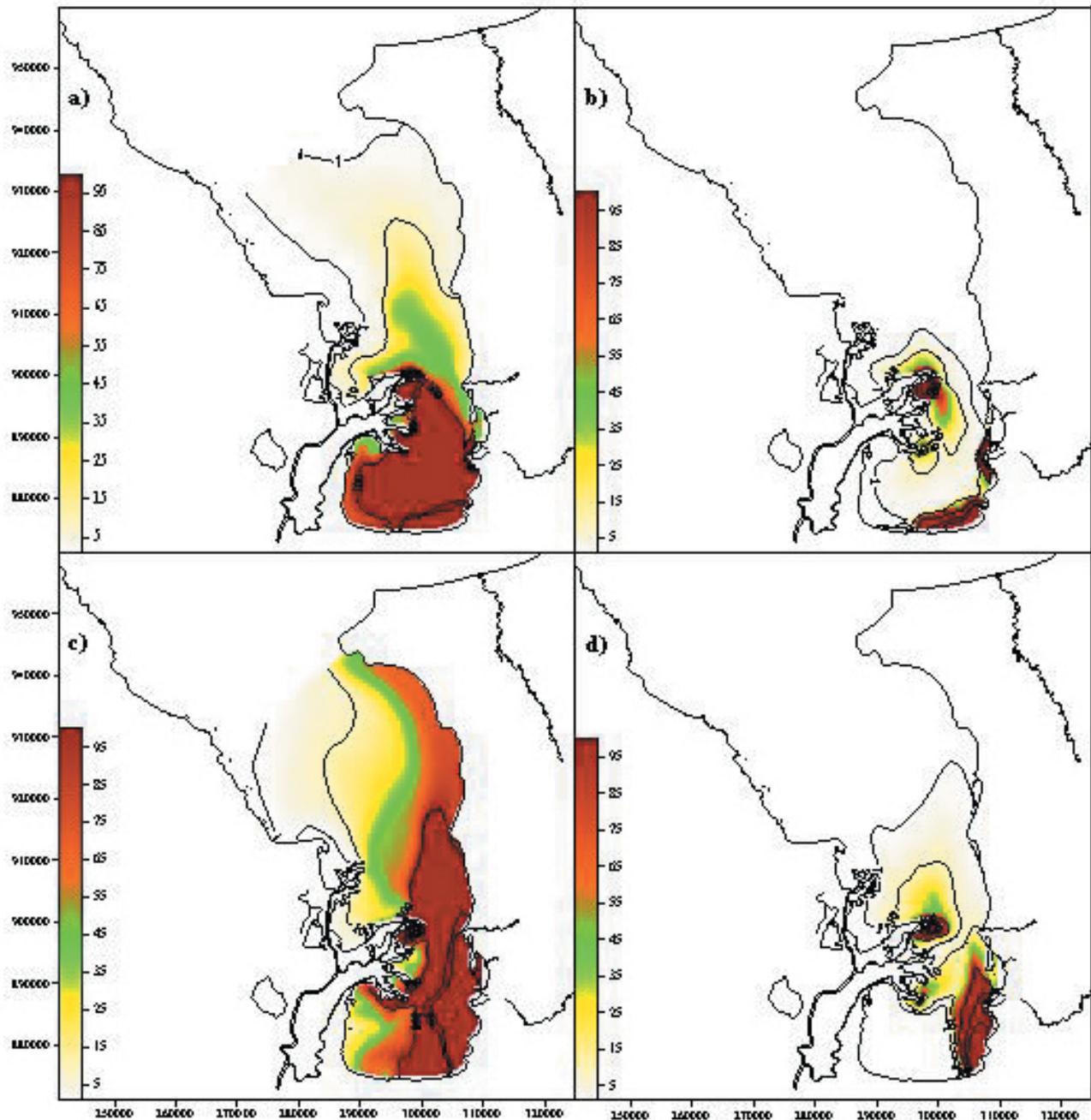


Figura 7. Distribuciones de coliformes fecales en la época seca (a, b) y húmeda (c, d) simuladas como una sustancia conservativa (a, c) y con una tasa de degradación de 4 horas (b, d).

DISCUSIÓN

Evidentemente es uno de los primeros estudios del Golfo de Urabá con aplicación de las herramientas de modelación. Las limitaciones relacionadas con datos disponibles hacen pensar en las posibles mejoras en la formulación del problema de descripción de la hidrodinámica del golfo. Particularmente, la ausencia de un monitoreo

permanente en una frontera líquida, la cual podría delimitar el dominio de cálculo, genera la necesidad de utilizar un modelo de mayor escala, por ejemplo, lo escrito en Lonin (2004). Incluso, esta opción ofrece la posibilidad de monitorear el golfo en forma operacional.

Dos aspectos de importancia en este contexto surgen: los datos sobre el régimen de vientos y los caudales de los ríos. Para el caso de

viento, en el reciente estudio de Lonin (publicación en preparación) se aplica un modelo atmosférico sobre la región del Golfo de Urabá con efectos orográficos, vegetación y rugosidad terrestre y se establece una correlación entre los datos puntuales disponibles (estaciones meteorológicas de Turbo y Los Cedros) con el comportamiento de los vientos sobre todo el golfo. Se demuestra que para una extensión del golfo de orden de 50-100 km, la aproximación de los vientos a través de campos homogéneos (no distribuidos en horizontal) produce un error significativo en la intensidad y dirección de corrientes, debido al efecto de rotación del viento y flujo de enstrofia en la superficie del mar.

Con respecto a los caudales, una posible opción se plantea utilizando los sensores remotos y solucionando un problema inverso, descrito en Roux & Dartus (2005). Los caudales pueden ser estimados desde las imágenes satelitales, optimizando ciertos parámetros de un modelo fluvial, observando lo único disponible en este caso – el ancho del flujo a lo largo del río y sus brazos.

Los datos de mediciones de campo, como regla, son asincrónicos. La Figura 2 muestra imposibilidad de presentar esta información en un solo plano. Los resultados del modelo (Figura 5) están libres de esta limitante. Para aumentar el rol de datos de campo, esta información, siempre valiosa, tendrá que considerarse útil en otros aspectos aun no implementados: cada campaña de mediciones tiene que ejecutarse registrando todos los parámetros necesarios para las corridas del modelo. Durante estas corridas, los datos medidos tienen que ingresar al modelo en forma consecutiva, de acuerdo con el momento de medición, y ser asimilados en el sistema. Los campos resultantes son productos verdaderos de un monitoreo, así como se explica en Lonin (2004).

De acuerdo con este concepto, la red de mediciones puede ser optimizada, midiendo solamente la cantidad necesaria de información, minimizando los gastos para las campañas de salidas al campo.

Regresando al tema del presente trabajo es importante mencionar que el problema de distribución de coliformes fue seleccionado tanto por su importancia en la salud humana,

como para hacer un primer paso en el estudio de la dinámica de las sustancias nocivas y componentes biogeoquímicos del medio ambiente para la descripción futura del ecosistema del Golfo de Urabá. En esta etapa fue observada la importancia de ambos procesos: abióticos (hidrodinámica) y bióticos (mortalidad). Con respecto al segundo, es todavía cuestionable la estimación de duración de vida de los coliformes en aguas poco transparentes; los experimentos del laboratorio tienen que efectuarse previamente y las condiciones de luz y de turbidez ser tenidos en cuenta en los modelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera J. (1988). Estudio oceanográfico para diseños de las obras de protección de las playas de Turbo, Informe interno CIOH, Cartagena.
- Arsitizábal O., M. Betancourt y C. Vásquez (1990). Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necoclí, Tesis (Geología), U. de EAFIT, Medellín, 345 p.
- Benavides J. Q. (2000). Condiciones meteorológicas y oceanográficas del Golfo de Urabá, Informe técnico, Acuerdo 002 CIOH-EAFIT.
- Blumberg, A. F. y G. L. Mellor (1987). A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, N. Heaps, Ed., AGU, pp. 1-16.
- Chevillot P. y A. Molina (1989). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá, Informe final CIOH, Cartagena.
- CIOH (1991a). Circulación de las aguas del Golfo de Urabá aplicando la percepción remota, Informe CIOH, Dic. 1991, 16 p.
- CIOH (1991b). Condiciones generales climáticas oceanográficas y geomorfológicas. Golfo de Urabá, Informe final CIOH, Anexo D. Octubre 1991, 20 p.
- CIOH (1993). Estudio hidrodinámico del Golfo de Urabá, Informe final CIOH, Junio 1993, 68 p.
- Cotero E. F. y J. F. Gómez Velásquez (1996). Evolución de la línea de costa del litoral antioqueño. Aspectos geomorfológicos. Sector: río Necoclí – Turbo, CORPOURABA, Apartadó, 118 p.
- Franco J. V. (1992). Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe colombiano, sector Punta Caribana – Boca Tarena, INGEOMINAS, Cartagena, 48 p.

- Municipio de Turbo (2000), *Plan de Ordenamiento Territorial (POT)*, Libro I: Diagnóstico por componentes.
- Lonin, S. A. (2004). Empleo de los datos de la NOAA-NODC-WOA en el modelo hidrodinámico del Caribe, *Boletín Científico CIOH*, (22), pp. 45-55.
- Lonin, S. A., C. A. Parra, C. A. Andrade, Yv.-F. Thomas (2004), Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena, *Boletín Científico CIOH*, (22), pp. 77-89.
- O.E.A. (1978). Proyecto Darién: Estudio para la orientación del desarrollo integral de la región del Darién colombiano, Medellín, 171 p.
- Roux, H. y D. Dartus (2005). Parameter identification using optimization techniques in open-channel inverse problem, *Journal of Hydraulic Research*, 43, (3), pp. 311-320.
- Sánchez, H. et al. (1990). *Nuevos Parques Nacionales de Colombia*, INDERENA, Primera edición, Bogotá, 20 p.
- Tuchkovenko, Yu. S. y S. R. Rondón (2002), Estudio de Comportamiento de la Contaminación Bacteriana en la Bahía de Cartagena. *Boletín Científico del CIOH*, (20), pp. 56-67.
- Zapata, L. (1998). Evaluación de zonas de erosión críticas en el litoral Caribe Antioqueño. Informe final. Facultad de Minas. U. Nal, Sede Medellín, 190 p.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue elaborado bajo la iniciativa privada de la compañía “Naval & Marítima Ingeniería Limitada” sobre un complejo de los estudios oceanográficos en el Golfo de Urabá. Los datos de temperatura y salinidad en el golfo fueron obtenidos dentro del proyecto “Unidad Ambiental Costera Darién” (convenio INVEMAR-CORPOURABÁ) y amablemente suministrados por CORPOURABÁ. Los autores están agradeciendo la Facultad de Oceanografía Física de la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla” por el apoyo prestado en la ejecución de este trabajo.