

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**RELACIÓN ENTRE LA HIDODINÁMICA Y LA DISTRIBUCIÓN DE
PATÓGENOS EN EL GOLFO DE URABÁ**

Luis Javier Montoya (1), Francisco Mauricio Toro (2) y Andrés Gómez-Giraldo (3)

(1) Universidad de Medellín, Colombia, ljmontoya@udem.edu.co

(2) Universidad Nacional de Colombia, Colombia, fmtoro@unal.edu.co

(3) Universidad Nacional de Colombia, Colombia, eagomezgi@unal.edu.co

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de simulaciones numéricas del transporte y variación de concentración de coliformes fecales y de E. Coli en la pluma del río Atrato utilizando los modelos hidrodinámico tridimensional ELCOM y de calidad de aguas CAEDYM. Los modelos se calibraron y validaron con muestras de agua tomadas en campo en cuatro campañas intensivas. Los resultados mostraron que la circulación del golfo de Urabá está sujeta a forzamientos energéticos como marea, esfuerzo del viento y flujo boyante de la descarga del río Atrato. El gran volumen descargado por el río Atrato genera una pluma de profundidades entre 2 m y 4 m la cual está afectada por la acción de las mareas y, principalmente, los vientos. Las condiciones de dicha pluma son propicias para el transporte de patógenos, por lo que concentraciones altas de coliformes fecales y E. coli se observaron cerca de las descargas de los ríos y, dependiendo del patrón de dispersión de la pluma, alcanzaron zonas distantes de su fuente. Se encontró además que existe una fuerte asociación entre la concentración de coliformes fecales y E. coli y las zonas ocupadas por el agua dulce, zonas de baja salinidad. Simulaciones y datos de campo muestran importantes campos en sus concentraciones y una interrelación con factores ambientales como salinidad, profundidad y temperatura.

ABSTRACT

Results of numerical simulations of the transport and evolution of concentration of fecal coliforms and E. coli in the Atrato River plume using ELCOM and CAEDYM are presented. Water samples from four intensive field campaigns were used to calibrate and validate the hydrodynamic and the water quality models. Results from the simulations reveal that the circulation in the gulf of Urabá depends on energetic forcing from sources as tides, wind stress and large buoyancy flux from the Atrato river discharge. The large volume of river discharge produces an estuarine plume front, 2m to 4m deep, which is driven by tides and, mainly, by winds. This plume has favorable conditions to pathogens transport, in such a way that high concentrations of fecal coliforms and E. coli were observed close to the river mouth and, depending on the plume dispersion pattern, they were spread to zones relatively distant from their source. A strong association between concentration of fecal coliforms and E. coli and freshwater zones were found. Simulations and field data reveals important changes in their concentration and a relationship with environmental factors as salinity, depth and water temperature.

PALABRAS CLAVES:

Golfo de Urabá, modelación hidrodinámica, transporte de patógenos.

INTRODUCCIÓN

Las plumas estuarinas cumplen un importante rol en el transporte de partículas en suspensión, tales como fitoplancton y zooplancton (García-Berdeal *et al.*, 2002), y de contaminantes y nutrientes (Spillman *et al.*, 2007; Harrison *et al.*, 2008, Díaz *et al.*, 2008), todos los cuales generan impactos sobre los ambientes costeros. En los estuarios, al descargar el agua dulce al mar, el agua dulce del río, tiende a dispersarse de forma superficial, sometida a la acción del viento y de las corrientes. Si la mezcla inducida por el viento y las mareas no es suficiente para romper la estabilidad inducida por las diferencias de densidad se forma una pluma, en donde el agua del río, menos densa, se dispersa de forma superficial sobre el agua oceánica. Esta pluma arrastra los contaminantes presentes en los ríos, haciendo que éstos se dispersen mar adentro, extendiéndose en zonas relativamente amplias en las cuales encuentran microorganismos patógenos en condiciones que favorecen su supervivencia como bajas salinidades y alta carga de sedimentos que inhiben la penetración de la radiación solar.

El camino más directo para conocer la contaminación de estas masas agua y sus riesgos sobre la vida humana es medir los agentes patógenos presentes en ellas, proceso técnicamente complejo y poco práctico por la gran cantidad de microorganismos potencialmente peligrosos. Por ello, se suelen utilizar organismos indicadores de la calidad microbiológica del agua de más fácil medición. En particular, se utilizan las bacterias indicadoras de contaminación fecal como los coliformes fecales y la *Escherichia coli* que están asociadas a la presencia de patógenos y que se presentan en altas concentraciones en aguas servidas (McLaughlin *et al.*, 2007). Para entender los patrones de dispersión de patógenos y su relación con la hidrodinámica de la zona de estudio se utilizó, en este estudio, el modelo ELCOM acoplado al modelo CAEDYM. Estos modelos permiten entender la dinámica de los patógenos mediante una simulación basada en los procesos físicos y biológicos que la gobiernan haciendo posible una descripción cuantitativa de los patógenos en este ambiente costero. El objetivo de realizar simulaciones con estos modelos es el de aproximarse a una descripción más completa de las rutas de contaminación microbiológicas en el golfo de Urabá, para evaluar potenciales riesgos de las zonas costeras. Estos modelos fueron calibrados y validados con datos obtenidos en cuatro campañas de medición. Los resultados obtenidos sirvieron para estudiar el transporte horizontal y la distribución vertical de estos microorganismos.

ZONA DE ESTUDIO Y ESTUDIOS PREVIOS

El golfo de Urabá se ubica entre las latitudes 7°55' N y 8°40' N y las longitudes 76°45' W y 77°15' W cerca a la frontera entre Colombia y Panamá, en el mar Caribe (Figura 1).

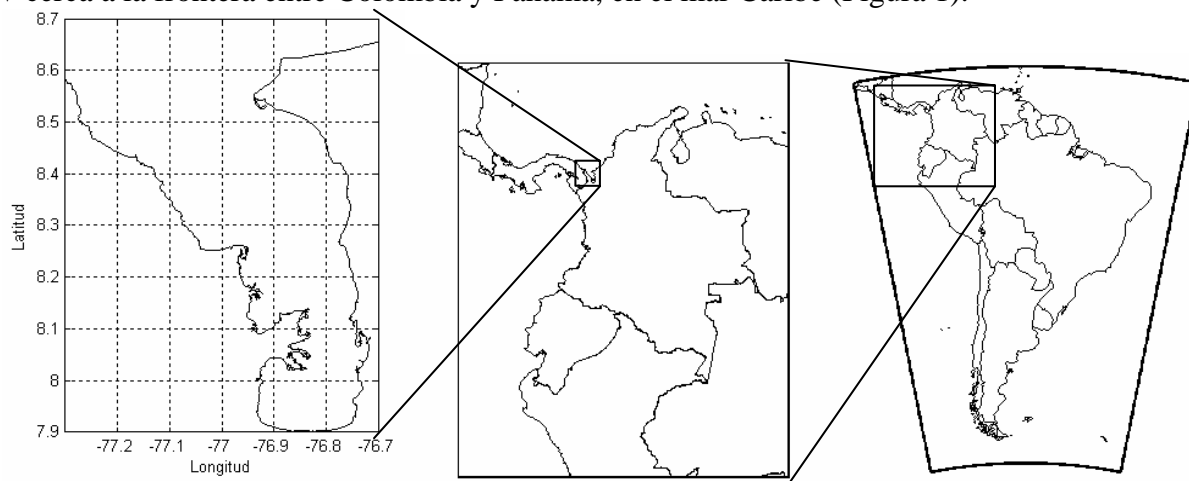


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

Esta zona recibe las descargas del río Atrato y otros ríos que arrastran residuos de agroquímicos, de metales pesados, de hidrocarburos, y de nutrientes provenientes de los centros humanos ubicados sobre las orillas reportando contaminación microbiológica en algunas playas, especialmente en la costa oriental del golfo, al sur en bahía Colombia y cerca a la desembocadura del río Atrato (INVEMAR, 2002). Sin embargo, son pocos los estudios realizados en la zona relacionados con la dispersión de patógenos.

Lonín y Vásquez (2005) estudiaron la hidrodinámica y la distribución de coliformes en el golfo de Urabá utilizando como valores para sus simulaciones los resultados de los estudios de CORPOURABA e INVEMAR en el 2003 (INVEMAR, 2003), en donde se resaltan altos valores en la concentración de coliformes fecales en cercanías a la desembocadura de los ríos León, Currulao y Turbo. Utilizando experimentos de no más de 12 horas con trazadores Langrangianos, estos investigadores encontraron que los alcances máximos de las coliformes en el golfo durante la época seca se concentran al interior de la bahía, mientras que en la época húmeda alcanzan a ser transportados más hacia el norte.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se recolectó información de campo en cuatro campañas oceanográficas en las estaciones mostradas en la Figura 2. El primer muestreo se realizó entre el 14 y el 17 de junio de 2006, en 15 estaciones seleccionadas de forma aleatoria; el segundo muestreo se realizó entre el 18 y 23 de agosto de 2006 en 13 estaciones; en el tercer muestreo, realizado entre el 20 y el 25 de noviembre de 2006 en 5 estaciones se hizo un seguimiento de las variables microbiológicas a lo largo del día; finalmente, el cuarto muestreo se realizó entre el 11 y el 16 de junio de 2007 con mediciones en 15 estaciones. En estas 48 estaciones se tomaron perfiles de salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, pH, se midió profundidad Secchi y se tomaron muestras de 100 ml de agua en superficie, a 2 m y a 5 m de profundidad. Las muestras fueron recolectadas con una botella tipo Nansen (muestreo 1) y una botella tipo Schindler (muestreros 2, 3 y 4) de 5 L. Las muestras fueron empacadas en bolsas estériles, rotuladas y almacenadas en una nevera a 4° C, para ser posteriormente procesadas en el laboratorio, obteniéndose el número máximo probable de coliformes fecales termotolerantes y de *E. coli* según SMEWW APHA-AWWA-WPCF (1998).

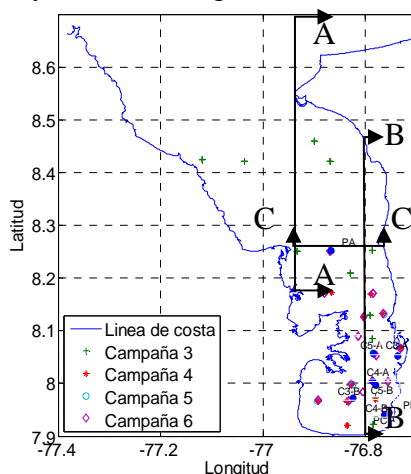


Figura 2. Ubicación de estaciones de muestreo de variables microbiológicas

En este estudio se utilizaron el modelo hidrodinámico ELCOM (Hodges y Dallimore, 2006) y el modelo de calidad de agua CAEDYM (Hipsey *et al.*, 2008), desarrollados por el “Centre for Water Research” (CWR) de la Universidad de “Western Australia”. El modelo CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamical Model), basado en procesos químicos y biológicos, puede ser acoplado al modelo ELCOM para estudiar ciclos de nutrientes, algas, dinámica de patógenos, estudios de transporte de sólidos suspendidos y de algunas sustancias tóxicas como algunos metales

pesados (Hipsey *et al.*, 2008). El modelo CAEDYM se acopla al modelo ELCOM para simular los procesos de advección, difusión, efectos debidos a la estratificación, transporte de sedimentos y resuspensión de sedimentos y patógenos. El modelo CAEDYM simula los procesos biológicos como el crecimiento y decaimiento de las bacterias (Hipsey *et al.*, 2008) y su configuración dependerá de los procesos que quieran ser simulados.

RESULTADOS

Al analizar la distribución de indicadores bacterianos en el golfo de Urabá, Gómez *et al.* (2008) reportaron la fuerte dependencia entre la salinidad y la presencia de estos indicadores en el golfo, resaltando el hecho de que las mayores concentraciones se encontraron en cercanías a las bocas de los ríos, resultado que insinúa el papel de la pluma del río Atrato en la dispersión y distribución de los organismos patógenos en el golfo.

Calibración y validación de los modelos numérico utilizados

Resultados en la mañana (6:00 a.m.) y en la tarde (6:00 p.m.) durante entrante y saliente de marea de un día típico de simulación durante la primera campaña se pueden observar en la Figura 3. Dicha campaña estuvo caracterizada por vientos muy variables en dirección y magnitud, con mayor frecuencia en dirección noreste, pero con algunos vientos muy intensos, especialmente del sur. En respuesta a ello, se observa una dirección del flujo superficial principalmente hacia el noreste; se observa que la pluma ocupa gran parte de la superficie del golfo, tanto al sur como al noreste, limitando las áreas con presencia de aguas oceánicas a una franja al noroeste. La pluma sale del golfo recostada a la margen nororiental y se observa una importante componente de la velocidad superficial en dirección norte, excepto en cercanía a las bocas de los ríos. Esta circulación superficial se encuentra fuertemente influenciada por la dirección del viento, los flujos mareales y una circulación de tipo baroclínica inducida por las diferencias de densidad entre las aguas del río y las aguas oceánicas. En la Figura 4 se presentan los resultados de la simulación de la campaña 2 (cada 6 horas) durante el sexto día de dicha campaña. En este caso se presenta un detalle de los resultados de las simulaciones al sur, en bahía Colombia, donde se concentraron la mayor parte de las mediciones de esta campaña, y se observa una corriente superficial principalmente hacia el norte. También se observan algunas diferencias en el patrón de velocidad en superficie de acuerdo a la fase de la marea, evidenciando la dependencia de la circulación superficial con los vientos y mareas. Las otras campañas presentan patrones de circulación similares.

Otra característica importante en la circulación es la estratificación vertical, tal como se ilustra en la Figura 5, donde se presentan contornos de salinidad a lo largo de dos secciones longitudinales (sección A-A y B-B ver localización en la en Figura 2) en dirección sur-norte para la campaña 1. En ellas se ilustra una haloclina cercana a los 2 m de profundidad con salinidades menores de 25 ups que identifica la pluma de aguas fluviales en la capa superficial y una zona con salinidades oceánicas por debajo de 2 m de profundidad.

Se realizó la calibración y validación de los modelos comparando los resultados de simulaciones considerando las condiciones meteorológicas (ver Figura 6) y oceánicas durante las campañas, con las mediciones. Detalles de la calibración y validación del modelo ELCOM se encuentran en Montoya y Toro, 2006 y en Montoya *et al.*, 2008).

Se realizaron simulaciones para las condiciones meteorológicas de los días de las campañas, se utilizaron caudales mensuales promedio en las desembocaduras y se estimaron las cargas de coliformes fecales y de *E. coli* en las bocas de los ríos utilizando el valor medio obtenido en estaciones cercanas a las bocas, asumiendo dichas concentraciones constantes durante toda la modelación. Además de las variables utilizadas en el modelo ELCOM, se incluyeron las constantes

que se presentan en la Tabla 1, donde se utilizaron los valores recomendados por Hipsey (2006), con algunas variaciones dentro de rangos reportados en la literatura realizadas durante la calibración. En la Figura 7 se presenta algunas comparaciones entre los valores medidos de concentración de coliformes fecales y de E. coli con los resultados de las simulaciones, se obtuvo un comportamiento consistente y se observó un buen ajuste dadas las incertidumbres presentes en las mediciones.

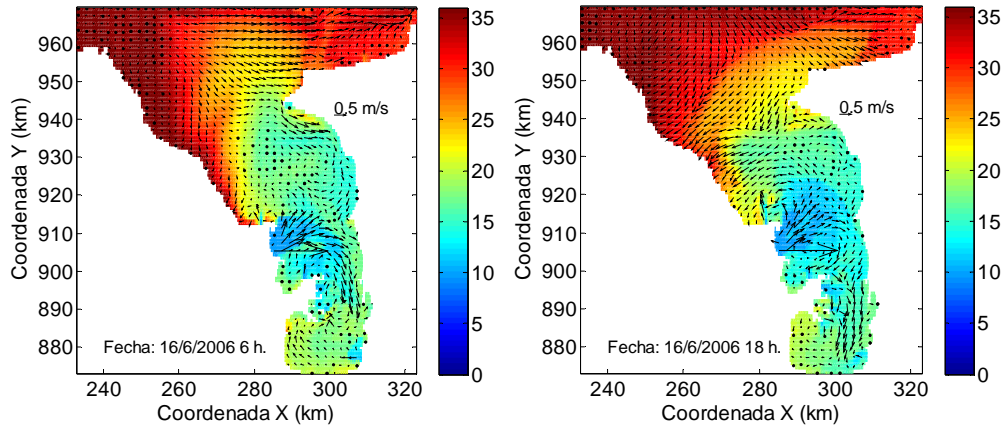


Figura 3. Evolución de la salinidad y velocidad en superficie en la campaña 1.

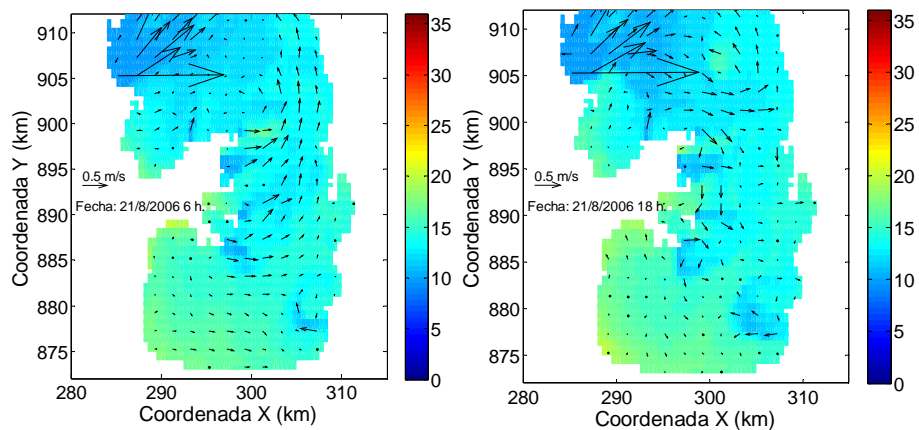


Figura 4. Evolución de la salinidad y velocidad en superficie en la campaña 2.

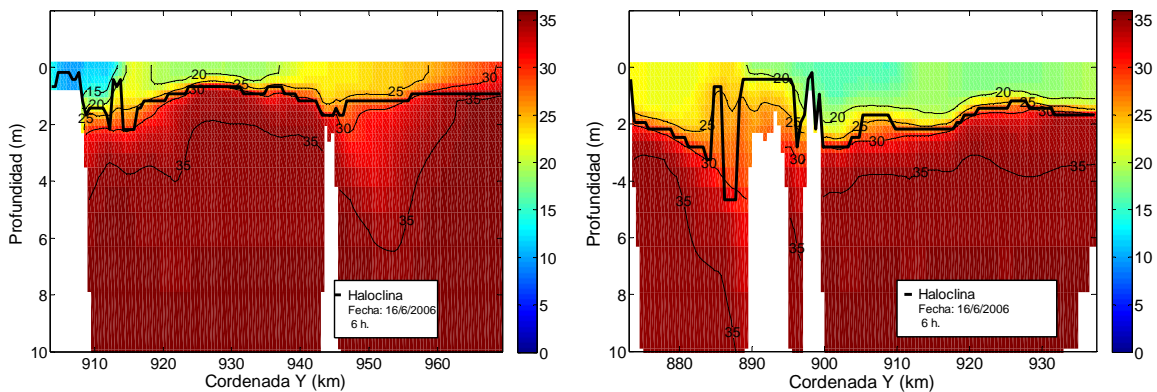
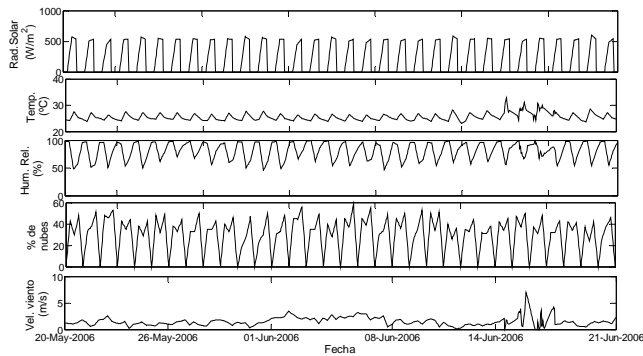
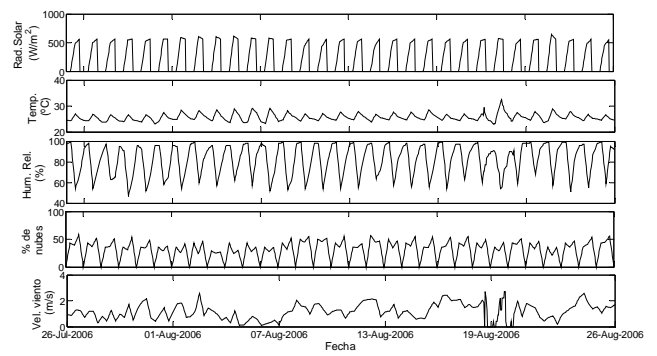


Figura 5. Evolución de la salinidad y velocidad en superficie en la campaña 2.



(a) Campaña Junio 2006

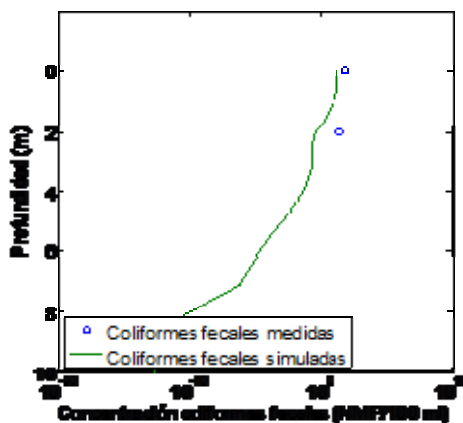


(b) Campaña Agosto 2006

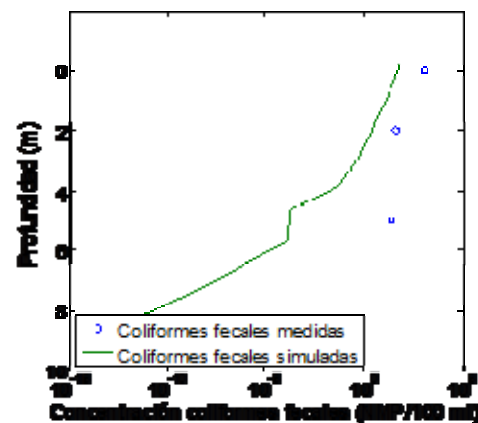
Figura 6. Condiciones meteorológicas utilizadas en la simulaciones. En cada panel de las gráficas se presenta, de arriba hacia abajo: Radiación solar, Temperatura del aire, Humedad relativa, Porcentaje de cobertura de nubes, y velocidad del viento.

Tabla 1. Parámetros utilizados en la simulación de variables microbiológicas (adaptado de Hipsey, 2006)

	Unidades	Coliformes Fecales	E. coli
Crecimiento			
Mortalidad			
Tasa de mortalidad en agua dulce a 20 ° C	día ⁻¹	0.71	0.48
Factor multiplicador para mortalidad en agua dulce		1.06	1.11
Tasa de mortalidad en agua oceánica a 20 ° C	día ⁻¹	1.66	1.09
Factor multiplicador para mortalidad en agua oceánica		1.10	1.09
Efectos de salinidad en la mortalidad		2E-3	2E-10
Parámetro que controla la dependencia de la salinidad		1.8	6.1
Inactivación por la luz solar			
Inactivación por la luz (visible)	m ² M/J	1.48E-08	1.48E-08
Inactivación por la luz (UV-A)	m ² M/J	1.18E-08	1.18E-08
Inactivación por la luz (UV-C)	m ² M/J	6.19E-08	6.19E-08
Efecto de la salinidad en la inactivación por la luz	m ² M/(J×ups)	0.00	0.00
Predación			
Pérdida debida a pastoreo	día ⁻¹	0.00	0.00
Sedimentación			
Velocidad de sedimentación a 20°C	m/día	-1.00E-6	-1.00E-6
Constantes de resuspensión			
Tasa de resuspensión	#/(m ² s)	0.01	0.01
Esfuerzo cortante crítico de resuspensión	N/m	0.010	0.010
Constante media de saturación de resuspensión		1.0E8	1.0E8



(a) Campaña 1. C3-A 8.05°N y 76.74°W



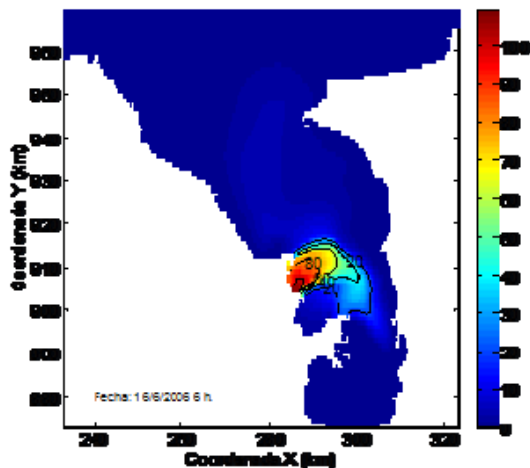
(b) Campaña 1. C3-B 7.97°N y 76.77°W

Figura 7. Comparación entre datos medidos y simulados de la concentración de coliformes fecales y de E. coli

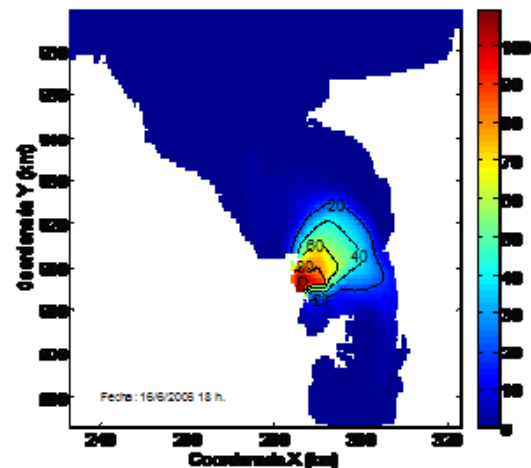
Resultados de las simulaciones

La campaña 1 corresponde a una condición de contaminación con concentraciones relativamente bajas, cuya descarga se presentó principalmente por las bocas del río Atrato y se encontró que la pluma de patógenos alcanza la margen oriental y que ésta se dirige al norte o al sur de acuerdo a la dirección impuesta por las corrientes mareales y por los vientos. En la Figura 8 (a) se ilustran los resultados en superficie de dicha simulación de la concentración de coliformes fecales a las 6:00 a.m. y a las 6:00 p.m. del 16 de junio de 2006 y se observa que la pluma de contaminantes se dirige hacia el sur, en respuesta a la marea entrante. Se observa un importante efecto de la contaminación por patógenos en la costa oriental del golfo, como resultado del arrastre por la pluma del río Atrato. La Figura 8 (b) presenta resultados similares a los anteriores para el caso de la E. coli. Se pueden observar similitudes con el patrón de salinidad presentado en la Figura 3 (aunque ocupando una extensión mucho menor).

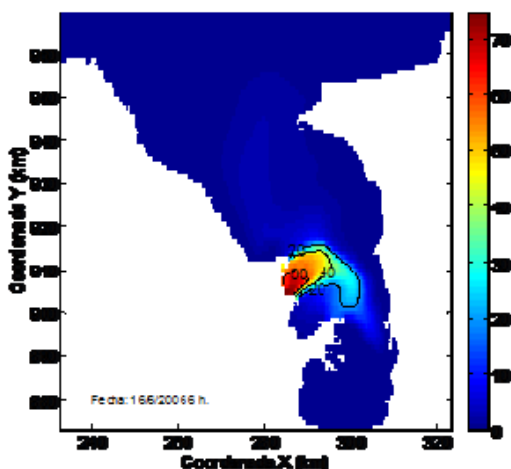
En la Figura 9 se presentan los cortes A-A y B-B (ver Figura 2) en los cuales se observa también un comportamiento superficial (no más de 2 m de profundidad) en la pluma de contaminación por coliformes con las mayores concentraciones ubicadas en la zona de baja salinidad (ver Figura 5).



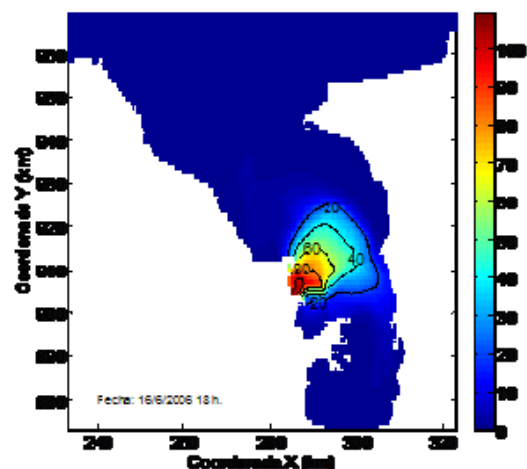
(a) Concentración de coliformes fecales (NMP/100 ml) en superficie, a las 6:00 a.m. Campaña 1



(b) Concentración de coliformes fecales (NMP/100 ml) en superficie, a las 6:00 p.m. Campaña 1.



(c) Concentración de E. Coli (NMP/100 ml) en superficie, a las 6:00 a.m. Campaña 1.



(d) Concentración de E. Coli (NMP/100 ml) en superficie, a las 6:00 p.m. Campaña 1.

Figura 8. Concentración de coliformes fecales y de E. coli durante las campaña 1

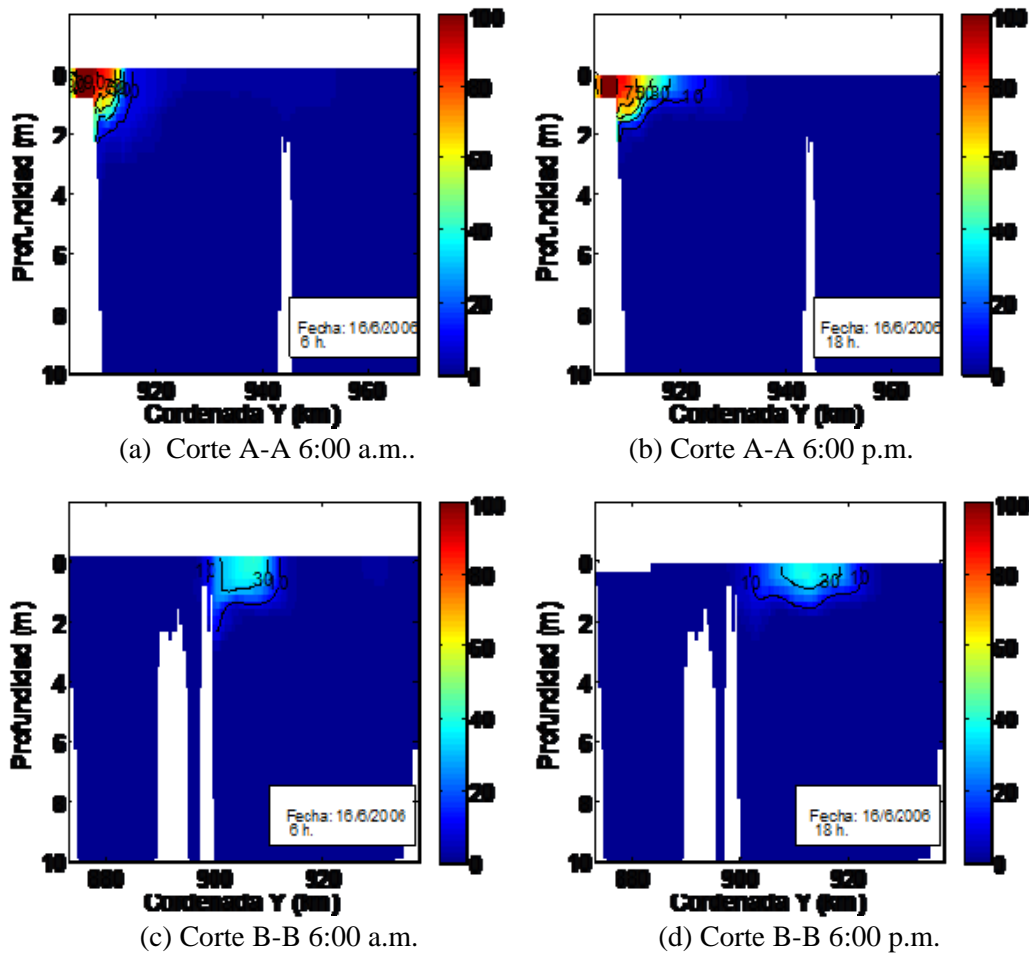


Figura 9. Concentración de coliformes fecales en el corte A-A y B-B en la campaña 1

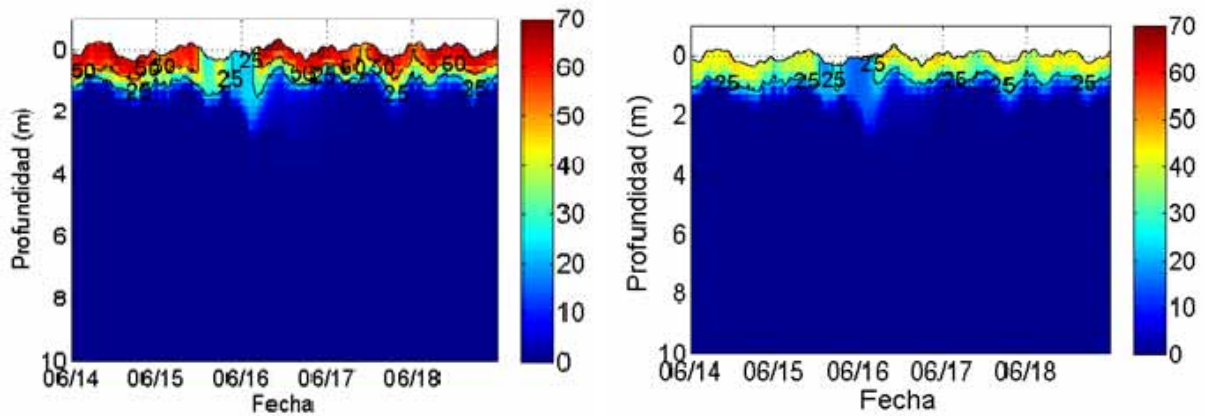
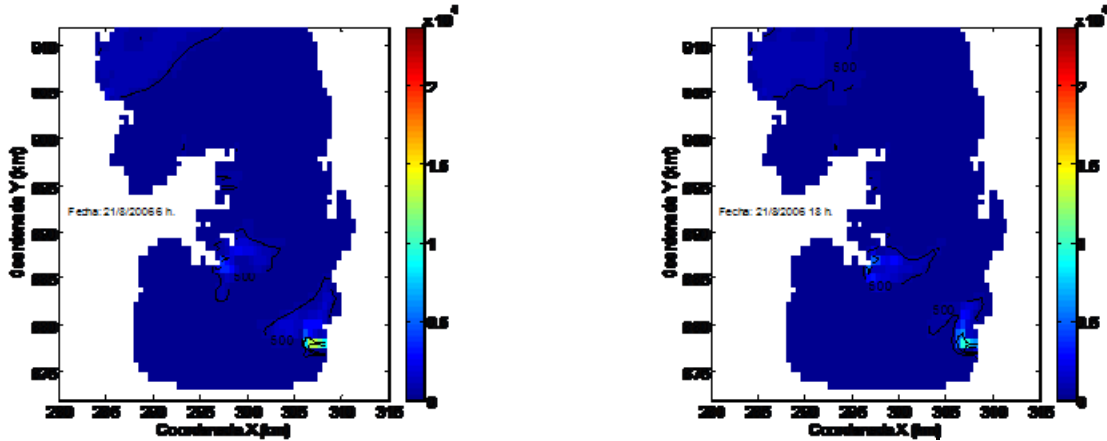


Figura 10. Concentración de coliformes fecales y de E. coli durante las campaña 1

Al comparar la extensión de la pluma de contaminación por coliformes fecales se puede observar que cuando la marea entra (Figura 9 (a) y (c)) su extensión es mucho menor que en marea saliente (Figura 9 (b) y (d)). El efecto de la marea también se muestra en la Figura 10 donde se observan variaciones periódicas en la profundidad ocupada por la pluma de coliformes fecales o de E. coli. Se observó una disminución significativa de los patógenos con la salinidad, hecho que se hace notorio al analizar la evolución de la concentración de estas bacterias en estos puntos por debajo de 2 m de profundidad, donde la salinidad es alta. Las mayores concentraciones de estas bacterias en la capa

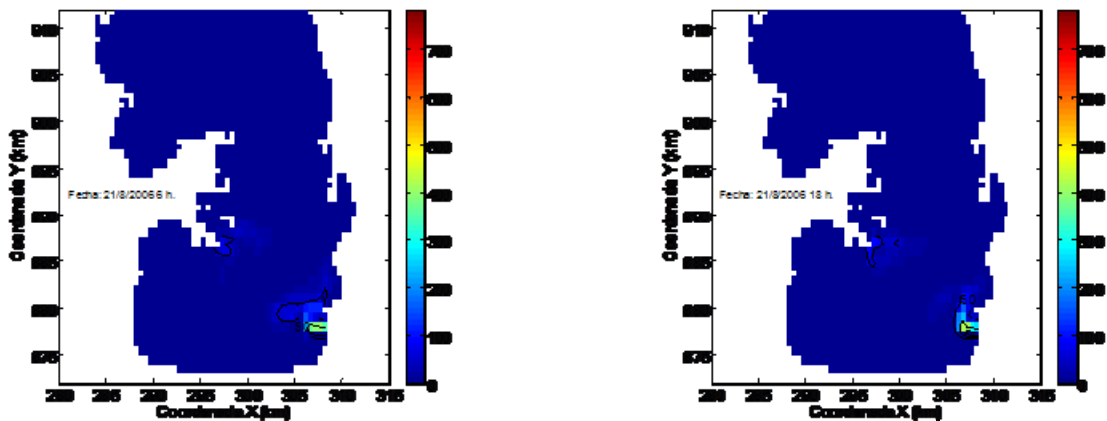
superior se explican por la menor salinidad de dicha capa que permite la presencia de dichos microorganismos y por la poca mezcla entre las dos capas por diferencia de densidades.

Las campañas 2 a 4 se concentraron en la zona sur del golfo, en bahía Colombia y en las bocas del río Atrato. La Figura 11a muestra los resultados en superficie de la simulación de la concentración de coliformes fecales a las 6:00 a.m. y a las 6:00 p.m. del 21 de agosto de 2006 y la Figura 11b las concentraciones de *E. coli* en la campaña 2. En este caso la mayor contaminación se produjo por la boca del río León y se observa una clara orientación hacia el norte, siguiendo la pluma de este río, con una zona afectada por contaminación por patógenos mucho menor que en la campaña 1. Sin embargo hay que resaltar que la carga contaminante de coliformes en el río León es mucho mayor, por lo que hay una presencia de mayores concentraciones de estos organismos patógenos en la zona de bahía Colombia.



(a) Concentración de coliformes fecales (NMP/100 ml) en superficie, a las 6:00 a.m. Campaña 2.

(b) Concentración de coliformes fecales (NMP/100 ml) en superficie, a las 6:00 p.m. Campaña 2.



(c) Concentración de *E. Coli* (NMP/100 ml) en superficie, a las 6:00 a.m. Campaña 2

(d) Concentración de *E. Coli* (NMP/100 ml) en superficie, a las 6:00 p.m. Campaña 2.

Figura 11. Concentración de coliformes fecales y de *E. coli* durante la campaña 2

DISCUSIÓN

La hidrodinámica controla la dinámica de los patógenos al determinar el transporte horizontal y vertical de los mismos. La circulación de patógenos está relacionada con la zona de influencia del agua dulce descargada por los ríos (Ferguson *et al.*, 1996; Chau y Jiang ,2002, Tournon *et al.*, 2007), debido a que la salinidad cumple un papel importante en la inactivación de patógenos (Burkhardt III *et al.*, 2000), inactivación resultado de un proceso inhibitorio en el desarrollo de los patógenos. Se observaron variaciones en la salinidad en la pluma, por la advección inducida por las corrientes mareales, la que explica las oscilaciones en la concentración de estas sustancias patógenas a lo largo del día (Figuras 8 a 10).

Es por esta relación compleja entre los diferentes agentes físicos presentes en el medio que se hace importante, para entender adecuadamente la dinámica de los patógenos. entender la circulación del cuerpo de agua. La supervivencia, crecimiento o decrecimiento y distribución de los microorganismos en el agua depende de la temperatura, la salinidad, la radiación solar, la presión, la radiación ultravioleta, los nutrientes, las sustancias tóxicas presentes en el agua, la depredación, la resuspensión de partículas con organismos asociados, y el crecimiento de organismos (Mestres Ridge, 2002). Todos estos agentes de forzamiento están considerados en los modelos utilizados lo que garantizó una adecuada correspondencia entre los resultados de la simulación con las mediciones de campo.

Uno de los principales factores que afectan la dispersión de los patógenos es el transporte horizontal, el cual, a su vez, está afectado principalmente por los patrones de circulación de corrientes que está controlado por los patrones de viento, las mareas y las descargas de los ríos. La distribución y transporte de patógenos en el golfo tiene una fuerte dependencia con la carga patógena en las descargas de los ríos y la dispersión de patógenos estará entonces relacionada con el patrón de movimiento de dicha pluma, muy influenciada por los procesos de intrusión y mezcla con las aguas oceánicas. En este sentido, la hidrodinámica controla la dinámica de los patógenos al determinar el transporte horizontal y vertical de los mismos.

El modelo CAEDYM realiza un balance de masa de los patógenos que entran y salen de cada celda del modelo. Los términos advectivos, la difusión turbulenta y las entradas y salidas del modelo son calculados de acuerdo a los resultados obtenidos del modelo hidrodinámico ELCOM y los términos relacionados con la inactivación, la sedimentación y la resuspensión están incluidos en el modelo CAEDYM. La inactivación se calcula de acuerdo a la expresión presentada en (1), la sedimentación y agregación a la expresión presentada en (2) y la resuspensión con la expresión presentada en (3).

$$f^{INV}(T, I_0, C^{VEc}) = [k_T + (k_{UVA} f_{UVA} e^{-\eta_A z} + k_{UVB} f_{UVB} e^{-\eta_B z} + k_{UVC} f_{UVC} e^{-\eta_C z}) I_0] C^{VEc} \quad (1)$$

$$f^{SET}(V_{sc}, C^{VEc}) = \frac{V_{sc}}{\Delta z} C^{VEc} \quad (2)$$

$$f^{RES}(\tau, C^V) = \alpha \frac{(\tau - \tau_{cr})}{\tau_{ref}} \frac{C^{SED}}{K_{TC} + C^{SED}} \frac{1}{\Delta z_{bot}} \quad (3)$$

Donde, t es el tiempo en días, $C^{VEc}(0)$ es la concentración inicial y k_T es una constante de decaimiento (en días⁻¹), representada como:

$$k_T = K_M M^{(T-20)} \quad (4)$$

K_M es una constante de mortalidad de la E. coli a 20°C y M es un factor multiplicador de la función de tasa de decaimiento con la temperatura y T es la temperatura en °C.

La radiación UV incidente es considerada como una fracción de la radiación de onda corta que llega a la superficie I_0 , así $I_{UV}(0) = f_{UV} I_0$ y decae exponencialmente con la profundidad a medida que entra en la columna de agua de acuerdo con la ley de Beer

Δz es el espesor de la celda y V_{sc} la velocidad de sedimentación que utiliza la ley de Stoke

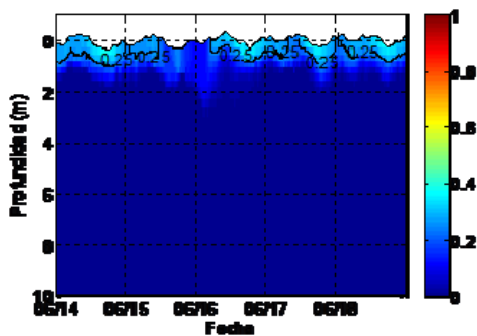
$$V_{sc} = \frac{g d_0^2 (\rho_0 - \rho_w)}{18\mu} \quad (5)$$

α es una constante para la tasa de resuspensión, τ_{cr} es el esfuerzo crítico de resuspensión, τ_{ref} un valor de esfuerzo cortante de referencia, K_{TC} es una constante media de saturación que controla la

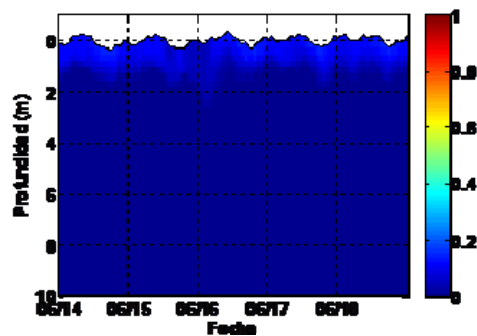
tasa de resuspensión basada en la cantidad disponible en los sedimentos y C^{SED} es la concentración de E. coli en los sedimentos.

Para analizar cuál es el proceso que domina la concentración de patógenos a partir de los resultados del modelo se puede evaluar el valor de cada uno de los términos considerados para representar el transporte. Varios mecanismos pueden dominar el transporte: (a) priman los términos advectivos-difusivos en la horizontal, la hidrodinámica de la capa superficial (que tiene poca mezcla con las capas profundas) controlaría el transporte y hay una conservación de partículas pero la masa de agua se va diluyendo a medida que se mezcla en la horizontal. (b) prima la acción inhibitoria de la temperatura, la radiación solar (c) la acción conjunta de la sedimentación y mezcla vertical de partículas y el control inhibitorio de la salinidad de las capas profundas.

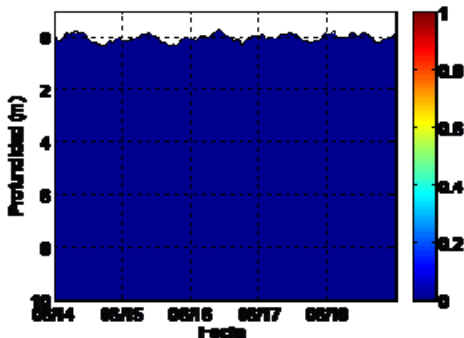
Para ilustrar la importancia de dichos procesos, en la Figura 12 (a) y (b) se presenta la evolución temporal de la inactivación de coliformes fecales y de E. coli en un punto de monitoreo ubicado en 8.25° N y 76.87°W, en ella se observa que se presenta inactivación de estos microorganismos especialmente en la zona ocupada por la pluma. Al comparar la evolución temporal de la concentración en dicho punto (Figura 10 (a) y (b)), se nota que los efectos de inactivación por la temperatura y la radiación solar son pequeños, esto insinúa que gran parte de la variación de la concentración estaría dominada por los procesos de advección-difusión. En la Figura 12 (c) y (b) se ilustra la poca sedimentación que se presenta de dichas partículas (con variaciones de la concentración muy pequeñas), dicho efecto combinado con la poca mezcla vertical (por la estabilidad generada en la pluma por la diferencia de densidades), explica que dichos microorganismos se mantengan en las capas superficiales (2 m).



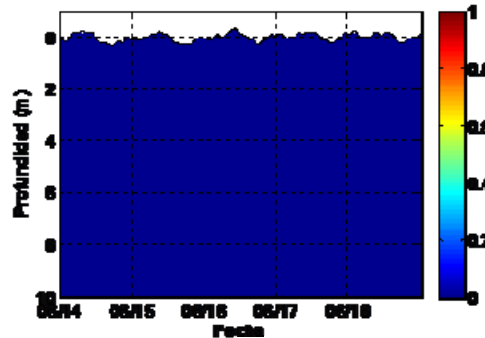
(a) Variación en la concentración de coliformes fecales (en NMP/100 ml) por inactivación por radiación solar y temperatura.



(b) Variación de la concentración de E. coli (en NMP/100 ml) por inactivación por radiación solar y temperatura.



(c) Variación en la concentración de coliformes fecales (en NMP/100 ml) por sedimentación



(d) Variación en la concentración de E. coli (en NMP/100 ml) por sedimentación.

Figura 12. Inactivación por radiación y temperatura durante la campaña 1 en un punto de monitoreo ubicado en 8.25° N y 76.87°W.

CONCLUSIONES

Resultados de simulaciones de la concentración de coliformes fecales y de *E. coli* muestran que la pluma del río Atrato influye en su dispersión. Hay altas concentraciones en las capas superficiales y bajas concentraciones (casi nula) en las aguas oceánicas (por debajo de 2 m) esto se debe a que hay muy poco transporte vertical entre la pluma y la capa oceánica profunda y a que la salinidades sobre 25 ups se inhibió la viabilidad de dichos coliformes. Se encontraron variaciones en la concentración de estas bacterias a lo largo del día, y se pudo observar un importante efecto de la contaminación por patógenos en la costa oriental del golfo, como resultado del arrastre por la pluma. También se encontró otra fuente de contaminación por coliformes fecales y *E. coli* al sur en bahía Colombia asociada a la descarga del río León, la que se dirige hacia el norte, recostada a la margen oriental del golfo.

Las simulaciones mostraron que la hidrodinámica del golfo cumple un papel fundamental en la distribución de microorganismos, controlando en gran medida el transporte horizontal. La estabilidad generada por la diferencia de densidades entre la pluma y la capa oceánica dificulta que las coliformes fecales y la *E. coli* ocupen las capas profundas, además en dichas capas existiría un efecto inhibitorio por parte de la salinidad.

Las simulaciones realizadas presentan los patrones de contaminación por bacterias indicadoras de calidad microbiológica en el golfo de Urabá. La dispersión de dichas bacterias estuvo controlada por la circulación inducida por el viento y por la acción de las mareas. Las mayores concentraciones se observan cerca de las descargas y están muy asociadas a la pluma de los ríos, ocupando extensiones importantes al interior del golfo y viajando en algunos casos grandes distancias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centre for Water Research (CWR) de la Universidad de Australia Occidental (UWA) por permitir la utilización de los modelos ELCOM y CAEDYM en este trabajo. A COLCIENCIAS quienes financiaron el trabajo de campo.

REFERENCIAS

APHA-AWWA-WPCF. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C., U.S.A.: Amer. Pub. Health Assoc.

Burkhardt III, W., Calci, K., Watkins, W., Rippey, S., y Chirtel, S. (2000). Inactivation of indicator microorganisms in estuarine waters. *Water Research*. 34 , 2207–2214.

Chau, K., y Jiang, Y. (2002). Three-dimensional pollutant transport model for the Pearl River estuary. *Water Research* 36 , 2029–2039.

Díaz, F., J.J., N., Courties, C., Rimmelin, P., y Oriol, L. (2008). Biogeochemical and ecological functioning of the low-salinity water lenses in the region of the Rhone River freshwater influence, NW Mediterranean Sea. *Continental Shelf Research*. 28 (12) .

Ferguson, C., Coote, B., Ashbolt, N., y Stevenson, I. (1996). Relationships between indicator, pathogens and water quality in an estuarine system. *Water Res.* 30 , 2045-2054.

García-Berdeal, I., Hickey, B., y Kawase, M. (2002). Influence of wind stress and ambient flow on a High Discharge River Plume. *Journal of Geophysical Research - Oceans*. 107. C9 , 13-1.

- Gómez, F., Aguirre, N., Betancur, J., y Toro, M.** (2008). Distribución de dos indicadores bacterianos de calidad de agua en el golfo de Urabá. *Gestión y Ambiente*. 11, 87-95.
- Harrison, P. J., Yin, K. D., Lee, J. H., Gan, J. P., y Liu, H. B.** (2008). Physical-biological coupling in the Pearl River Estuary. *Continental Shelf Research* , 28, 1405– 1415.
- Hipsey, M.** (2006). Microbial pollution in aquatic systems. University of Adelaide: Thesis. School of Earth and Environmental Sciences.
- Hipsey, M., Antenucci, J., y Hamilton, D.** (2008). *Computational aquatic ecosystem dynamics model: CAEDYM v3.v3.2 Science Manual*. University of Western Australia: Centre for Water Research.
- Hodges, B., y Dallimore, C.** (2006). ELCOM Science Manual. Perth: Center for Water Research.
- INVEMAR.** (2002). Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2001. Santa Marta: INVEMAR.
- INVEMAR.** (2003). Diagnóstico, zonificación y la definición de la estructura administrativa de la unidad ambiental costera del Darién, Caribe Colombiano. Santa Marta: INVEMAR.
- Lonin, S., y Vásquez, J.** (2005). Hidrodinámica y distribución de coliformes en el golfo de Urabá. *Boletín científico CIOH*. 23 , 76-89.
- Mestre-Ridge, M.** (2002). *Three-dimensional simulation of the pollutant dispersion in coastal waters*. Universidad politécnica de Cataluña: Tesis.
- McLaughlin, K., Ahn, J., Litton, R., y Grant, S.** (2007). Use of salinity mixing models to estimate the contribution of creek water fecal indicator bacteria to an estuarine environment: Newport Bay, California. *Water Research*. 41 , 3595-3604.
- Montoya, L.J., y Toro, M.** (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el golfo de Urabá, Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*. 13 , 37-54.
- Montoya, L.J., Toro, M. y Gómez-Giraldo, A.** (2008) Modelación hidrodinámica de la pluma del río Atrato en el golfo de Urabá, Colombia. XXIII Congreso Lationamericano de hidráulica. Cartagena-Colombia.
- Spillman, C., Imberger, J., Hamilton, D., Hipsey, M., y Romero, J.** (2007). Modelling the effects of Po River discharge, internal nutrient cycling and hydrodynamics on biogeochemistry of the Northern Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems*. 68 , 167–200.
- APHA-AWWA-WPCF.** (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C., U.S.A.: Amer. Pub. Health Assoc.
- Touron, A., Berthe, T., Gargala, G., Fournier, M., Ratajczak, M., Servais, P., y otros.** (2007). Assessment of fecal contamination and the relationship between pathogens and fecal bacterial indicators in an estuarine environment (Seine, France). *Mar. Pollut. Bull.* 54 , 1441-1450.