

---

# PUERTO MARITIMO DE GUAYAQUIL



## FASE II - CAPITULO 16 Modelamiento Matemático

Realizado por:



Preparado para:



**Guayaquil, Junio del 2012**

---

## TABLA DE CONTENIDO

<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>16-1</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>16-3</b>
<b>16. MODELAMIENTO MATEMÁTICO.....</b>	<b>16-8</b>
16.1. Antecedentes.....	16-8
16.2. Objetivo.....	16-8
16.3. Modelación Hidrodinámica y de Transporte de Sedimentos Cohesivos .....	16-8
16.3.1. Hipótesis.....	16-9
16.3.2. Dominio Espacial.....	16-9
16.3.2.1. Malla.....	16-11
16.3.2.2. Batimetría .....	16-14
16.3.3. Dominio Temporal .....	16-17
16.3.4. Condiciones Iniciales .....	16-17
16.3.5. Condiciones de Frontera .....	16-18
16.4. Análisis de la información .....	16-18
16.4.1. Niveles .....	16-19
16.4.2. Corrientes.....	16-21
16.4.2.1. Temperatura y salinidad .....	16-32
16.4.2.2. Concentración de sólidos en suspensión.....	16-33
16.4.3. Tasa de azolvamiento.....	16-33
16.5. Simulaciones de Prueba .....	16-34
16.6. Calibración del Modelo.....	16-41
16.6.1. Comparación de niveles .....	16-43
16.6.2. Comparación de velocidades.....	16-45
16.6.3. Comparación de concentración de sedimentos y azolvamiento del canal de navegación .....	16-55
16.6.3.1. Esfuerzo cortante que ejerce el flujo en el fondo.....	16-55
16.6.3.2. Concentración de sólidos en suspensión .....	16-59
16.6.3.3. Cambio total del espesor de la capa de fondo .....	16-63
16.6.3.4. Cálculo del volumen de azolvamiento por tramo .....	16-67
16.7. Escenarios de cálculo .....	16-68
16.7.1. Caso base .....	16-68
16.7.1.1. Análisis del prisma de marea .....	16-68
16.7.2. Canal de navegación dragado .....	16-73
16.7.2.1. Análisis de la batimetría .....	16-73
16.7.2.1. Análisis del nivel de la superficie libre del agua .....	16-74
16.7.2.1. Análisis de la velocidad de la corriente .....	16-76
16.7.2.1. Análisis del esfuerzo cortante que ejerce el flujo en el fondo .....	16-78
16.7.2.1. Análisis de la concentración de sólidos en suspensión .....	16-80
16.7.2.1. Análisis del cambio total en el espesor de la capa de fondo .....	16-82
16.7.2.2. Análisis del volumen de azolvamiento por tramo .....	16-84



16.7.2.3. Análisis del comportamiento de cada tramo respecto a la cota de dragado.....	16-0
16.8. Conclusiones .....	16-5
16.9. Recomendaciones .....	16-6
16.10. Modelación Mike 21 – Módulos .....	16-1
16.11. Bibliografía .....	16-5

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-2



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estadísticas de los niveles medidos en las estaciones mareográficas Posorja, Enfilada y Puerto. ....	16-20
Tabla 2. Cálculo del coeficiente de Chezy basándose en las mediciones de nivel y velocidad en las estaciones EHS03 y EHS06. V es la velocidad, $R_h$ el radio hidráulico, $S_h$ la pendiente hidráulica y C el coeficiente de Chezy.....	16-32
Tabla 3. Cálculo de la Tasa de Azolvamiento.....	16-33
Tabla 4. Diferencia entre la amplitud medida en las estaciones mareográficas Posorja, Enfilada y Puerto y la amplitud calculada con $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . ....	16-45
Tabla 5. Cálculo de la media cuadrática (RMS) de las diferencias entre los niveles medidos y calculados ( $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ) en las estaciones mareográficas Posorja, Enfilada y Puerto. ....	16-45
Tabla 6. Cálculo de la media cuadrática (RMS) de las diferencias entre la magnitud de la velocidad medida y calculada ( $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ) en las estaciones EHS01, EHS03, EHS05, EHS06, EHS07, EHS08, EHS09 y EHS10. ....	16-54
Tabla 7. Cálculo de la media cuadrática (RMS) de las diferencias entre la dirección de la velocidad medida y calculada ( $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ) en las estaciones EHS01, EHS03, EHS05, EHS06, EHS07, EHS08, EHS09 y EHS10. ....	16-54
Tabla 8. Comparación de la Tasa de Azolvamiento medida y calculada.....	16-68
Tabla 9. Definición de tramos en los que se divide el canal de navegación para su análisis. ....	16-73
Tabla 10. Tasa promedio de sedimentación ( $\text{mm}/\text{m}^2/30\text{días}$ ) y estimación del volumen anual de azolvamiento ( $1\text{E}6 \text{ m}^3$ ) en cada uno de los tramos que se dividió el canal, para los diferentes escenarios de dragado.....	16-0

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-3



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del dominio de cálculo y delimitación del área de calibración.....	16-10
Figura 2. Definición de las cinco zonas utilizadas para la construcción de la malla. ....	16-11
Figura 3. Discretización del Dominio Espacial (Estero Salado – Río Guayas) con malla no estructurada. ....	16-12
Figura 4. Discretización del Dominio Espacial (Estero Salado – Río Guayas) con malla no estructurada. Acercamiento a la zona del Puerto de Guayaquil. ....	16-13
Figura 5. Discretización del Dominio Espacial (Estero Salado – Río Guayas) con malla no estructurada. Acercamiento al canal del Morro. ....	16-13
Figura 6. Discretización del Dominio Espacial (Estero Salado – Río Guayas) con malla no estructurada. Acercamiento al Canal de navegación entre las boyas 36 y 54. ....	16-14
Figura 7. Batimetría del dominio espacial de cálculo. La batimetría del Estero Salado y canal Cascajal corresponde al levantamiento de noviembre de 2010. La batimetría del Río Guayas y Golfo de Guayaquil corresponde a las cartas náuticas IOA107PSAD56 y IOA107WGS84. ....	16-15
Figura 8. Batimetría del dominio espacial de cálculo. Acercamiento al Puerto de Guayaquil.....	16-16
Figura 9. Batimetría del dominio espacial de cálculo. Acercamiento al Canal del Morro.....	16-16
Figura 10. Batimetría del dominio espacial de cálculo. Acercamiento al Canal de navegación entre las boyas 36 y 54. ....	16-17
Figura 11. Gastos promedios mensuales por el Río Guayas suponiendo regulado el Río Daule. ....	16-18
Figura 12. Elevación de la superficie libre del agua en tres puntos del Estero Salado: Posorja, Enfilada y Puerto. ....	16-20
Figura 13. Pendiente hidráulica medida entre Posorja y Enfilada C2. ....	16-20
Figura 14. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS01. ....	16-23
Figura 15. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS02. ....	16-24
Figura 16. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS03. ....	16-25
Figura 17. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS05. ....	16-26
Figura 18. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS06. ....	16-27
Figura 19. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS07. ....	16-28
Figura 20. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS08. ....	16-29
Figura 21. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS09. ....	16-30
Figura 22. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS10. ....	16-31
Figura 23. Croquis del volumen de control utilizado para estimar el coeficiente de Chezy. ....	16-32
Figura 24. Localización de puntos para el monitoreo de la solución. ....	16-34
Figura 25. Niveles calculados en varios puntos del modelo. A la izquierda se muestran los 42 días de la simulación, mientras que a la derecha se muestran sólo los dos primeros días. ....	16-35
Figura 26. Diferencia de niveles calculados entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. A la izquierda se muestran los 42 días de la simulación, mientras que a la derecha se muestran sólo los dos primeros días. ....	16-35
Figura 27. Velocidades calculadas en varios puntos del modelo. Se muestran sólo los dos primeros días. ....	16-36
Figura 28. Diferencia de velocidades calculadas entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. Se muestran sólo los dos primeros días. ....	16-37
Figura 29. Temperaturas calculadas en varios puntos del modelo. ....	16-37
Figura 30. Diferencia de temperaturas calculadas entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. ....	16-38

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-4



Figura 31. Salinidad calculada en varios puntos del modelo. .... 16-38

Figura 32. Diferencia de salinidad calculada entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. . 16-39

Figura 33. Concentración de sólidos en suspensión calculada en varios puntos del modelo. .... 16-40

Figura 34. Diferencia de concentración de sólidos en suspensión calculada entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. A la izquierda se muestran los 42 días de la simulación, mientras que a la derecha se muestran sólo cinco días. .... 16-40

Figura 35. Esfuerzo cortante en el fondo calculado en varios puntos del modelo. .... 16-41

Figura 36. Diferencia de Esfuerzo cortante en el fondo calculado entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. A la izquierda se muestran los 42 días de la simulación, mientras que a la derecha se muestran sólo cinco días. .... 16-41

Figura 37. Comparación de niveles en el puerto de Posorja. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . . 16-43

Figura 38. Comparación de niveles en la Enfilada C2. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . .... 16-44

Figura 39. Comparación de niveles en el Puerto de Guayaquil. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . . 16-44

Figura 40. Comparación de velocidades en la estación EHS01. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en Posorja. .... 16-47

Figura 41. Comparación de velocidades en la estación EHS03. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en Posorja. .... 16-48

Figura 42. Comparación de velocidades en la estación EHS05. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en Posorja. .... 16-49

Figura 43. Comparación de velocidades en la estación EHS06. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en la Enfilada C2. .... 16-50

Figura 44. Comparación de velocidades en la estación EHS08. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en la Enfilada C2. .... 16-52

Figura 45. Comparación de velocidades en la estación EHS10. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en la Enfilada C2. .... 16-53

Figura 46. Esfuerzo cortante de fondo durante el flujo, 12 de enero de 2012 a las 6:00..... 16-56

Figura 47. Esfuerzo cortante de fondo durante el reflujó, 12 de enero de 2012 a las 12:00. .... 16-57

Figura 48. Esfuerzo cortante de fondo a lo largo del canal de navegación durante el flujo y el reflujó del 12 de enero de 2012 a las 6:00 y a las 12:00, respectivamente. Se muestra también la configuración del fondo para referencia..... 16-58

Figura 49. Esfuerzo cortante de fondo sobre el canal de navegación a la altura de las boyas 8 (12+500), 24 (38+400), 44 (54+400) y 67 (80+900). .... 16-59

Figura 50. Concentración de sólidos en suspensión durante el flujo, 12 de enero de 2012 a las 6:00. 16-60

Figura 51. Concentración de sólidos en suspensión durante el reflujó, 12 de enero de 2012 a las 12:00. .... 16-61

Figura 52. Concentración de sólidos en suspensión a lo largo del canal de navegación durante el flujo y el reflujó del 12 de enero de 2012 a las 6:00 y a las 12:00, respectivamente. Se muestra también la configuración del fondo para referencia..... 16-62

Figura 53. Concentración de sólidos en suspensión sobre el canal de navegación a la altura de las boyas 8 (12+500), 24 (38+400), 44 (54+400) y 67 (80+900). .... 16-63

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-5

Figura 54. Comparación del comportamiento del esfuerzo en la capa de fondo (BSS), la concentración de sólidos en suspensión (SSC) y el cambio en el espesor de la capa de fondo (TBTC) sobre el canal de navegación a la altura de las boya 48, hacia la mitad del periodo de simulación (12 de enero 2012). Se muestra también el nivel del agua en la estación Enfilada C2..... 16-64

Figura 55. Cambio total en el espesor de la capa de fondo al final de los 30 días de simulación. .... 16-65

Figura 56. Cambio en el espesor de la capa de fondo a lo largo del canal de navegación después de 10, 20 y 30 días de simulación. .... 16-66

Figura 57. Cambio en el espesor de la capa de fondo sobre el canal de navegación a la altura de las boyas 8, 24, 44 y 67, a lo largo de los 30 días de simulación..... 16-67

Figura 58. Localización de las secciones de control EHS01, EHS05 y Enfilada. .... 16-70

Figura 59. Gasto que pasa por las secciones EHS01, EHS05 y Enfilada a lo largo de toda la simulación, del 27 de diciembre de 2011 a las 0h00 al 26 de enero de 2012 a las 0h00..... 16-71

Figura 60. Prisma de marea por las secciones EHS01, EHS05 y Enfilada a lo largo de toda la simulación, del 27 de diciembre de 2011 a las 0h00 al 26 de enero de 2012 a las 0h00..... 16-71

Figura 61. Prisma de marea por las secciones EHS01, EHS05 y Enfilada, durante el día 12 de enero de 2012..... 16-72

Figura 62. Volumen de sedimentos en suspensión transportados por las secciones EHS01, EHS05 y Enfilada a lo largo de toda la simulación, del 27 de diciembre de 2011 a las 0h00 al 26 de enero de 2012 a las 0h00. .... 16-72

Figura 58. Diferencia de cotas entre la batimetría del caso del canal dragado a la cota -11,0m y el caso base (condiciones actuales). .... 16-74

Figura 59. Nivel de la superficie libre del agua durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para el caso base y la cota de dragado: 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal. .... 16-75

Figura 60. Diferencia de nivel de la superficie libre del agua durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación entre el caso que considera un dragado a la cota -11,0 m y el caso base (condiciones actuales). Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal. .... 16-75

Figura 61. Diferencia de nivel de la superficie libre del agua durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) entre el caso que considera un dragado a la cota -11,0 m y el caso base (condiciones actuales)..... 16-76

Figura 62. Velocidad de la corriente durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para el caso base y la cota de dragado: 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal..... 16-77

Figura 63. Diferencia de velocidad durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación entre el caso que considera un dragado a la cota -11,0 m y el caso base (condiciones actuales). Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal. .... 16-77

Figura 64. Diferencia de velocidad durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) entre el caso que considera un dragado a la cota -11,0 m y el caso base (condiciones actuales)..... 16-78

Figura 65. Esfuerzo cortante de fondo durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para diferentes cotas de dragado: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal..... 16-79

Figura 66. Diferencia del esfuerzo cortante de fondo durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación, entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base. .... 16-79

Figura 67. Diferencia (mapa 2D) del esfuerzo cortante de fondo durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base..... 16-80

Figura 68. Concentración de sólidos en suspensión durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para diferentes cotas de dragado: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal. .... 16-81

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-6



Figura 69. Diferencia en la concentración de sólidos en suspensión durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación, entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal. .... 16-81

Figura 70. Diferencia (mapa 2D) de concentración de sólidos en suspensión durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00), entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base. .... 16-82

Figura 71. Cambio total en el espesor de la capa de fondo, a los 30 días de simulación, a lo largo del canal de navegación para diferentes cotas de dragado: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal..... 16-83

Figura 72. Cambio total en el espesor de la capa de fondo en la boya 44 para diferentes cotas de dragado del canal de navegación: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m..... 16-84

Figura 73. Incremento de la tasa promedio de sedimentación (%) respecto al caso base, para los diferentes escenarios de dragado, en cada uno de los tramos que se dividió el canal. .... 16-0

Figura 74. Incremento del volumen de azolvamiento anual (%) respecto al caso base, para los diferentes escenarios de dragado, en cada uno de los tramos que se dividió el canal. .... 16-1

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-7

## 16. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

### 16.1. Antecedentes

Un modelo matemático es un tipo de modelo científico que utiliza algún formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones. Estos modelos se utilizan para analizar los comportamientos de sistemas complejos ante situaciones que resultan difíciles de observar en la realidad, tal es el caso del comportamiento de los sedimentos en el Canal de Acceso a Puerto Marítimo.

Los modelos de las ciencias físicas constituyen una traducción de la realidad física para posibilitar la aplicación de los instrumentos y las técnicas de las teorías matemáticas en el estudio del comportamiento de sistemas complejos. Siguiendo el camino inverso, pueden traducirse los resultados numéricos a la realidad física, para lo cual emplea simulaciones para diferentes escenarios.

Los modelos matemáticos pueden dividirse en deterministas (no hay incertidumbre respecto a la forma del resultado y los datos utilizados son completamente conocidos y determinados) y estocásticos (son modelos probabilísticos, ya que no se conoce el resultado esperado sino su probabilidad).

Respecto a la función del origen de la información utilizada, los modelos matemáticos pueden clasificarse en heurísticos (se basan en las explicaciones sobre las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno estudiado) o empíricos (se basan en las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado).

En este presente caso, el Modelo Matemático de Transporte de Sedimentos, es un Modelo determinista y por su función del origen de la información es un Modelo heurístico.

### 16.2. Objetivo

Calcular la hidrodinámica y el transporte de sedimentos del canal de navegación de la Terminal Marítima Simón Bolívar, localizada en el Estero de Guayaquil, Ecuador, bajo diferentes escenarios.

### 16.3. Modelación Hidrodinámica y de Transporte de Sedimentos Cohesivos

Para la modelación de la Hidrodinámica (HD) y del Transporte de sedimentos cohesivos (MT) se utiliza el sistema MIKE21 FM, el cual es un programa desarrollado por el Instituto Danés de Hidráulica (DHI, por sus siglas en inglés).

El módulo hidrodinámico está basado en la solución numérica en las ecuaciones bidimensionales (2D) de aguas poco profundas. Esto es, las ecuaciones de Navier-Stokes integradas en la vertical, bajo las hipótesis de incompresibilidad, presión hidrostática, aguas poco profundas y esfuerzos de Reynolds. El MIKE21 HD puede

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-8



considerar la densidad del agua constante (flujo barotrópico) o función de la temperatura y la salinidad (flujo baroclínico). Por lo tanto, el modelo consiste de las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, temperatura, salinidad y densidad.

La discretización espacial se realiza utilizando un método de volumen finito de celdas centradas. El dominio espacial es discretizado con elementos que se traslapan entre sí. En el plano horizontal se usa una malla no estructurada que puede estar compuesta por elementos triangulares o rectangulares, o una combinación de ambos. Para el cálculo de los flujos convectivos se utiliza el método de Riemann, lo cual permite resolver casos con soluciones discontinuas.

Para la integración de las ecuaciones en el tiempo se utiliza un esquema explícito.

El módulo de transporte de lodos (MIKE21 MT) describe la erosión, transporte y depósito de lodos (limos y arcillas) o mezclas de arena y lodo, bajo la acción de las corrientes y el oleaje.

En las simulaciones con este módulo pueden incluirse los siguientes procesos: acción del oleaje, floculación, descripción detallada del proceso de depósito de partículas, descripción del fondo en varias capas, actualización de la configuración del fondo (cálculo morfológico).

### 16.3.1. Hipótesis

Se supone que el fluido es barotrópico (incompresible y de densidad constante), que el sedimento transportado se describe con un solo diámetro y no se incluyen los procesos de floculación, ni consolidación de las capas sedimentadas.

Se supone que la hidrodinámica del canal de navegación es responsabilidad únicamente de la marea y que el transporte de sedimentos es responsabilidad únicamente de estas corrientes de marea. Por lo tanto, aunque se incluye el efecto de la diferencia de salinidad, no se simula el efecto 3D de la cuña salina (diferencias de velocidad a lo largo de la columna de agua) y no se considera el paso de las embarcaciones en el transporte de sedimentos.

### 16.3.2. Dominio Espacial

Aunque la zona de calibración se limita al Canal de Navegación dentro del Estero Salado, debido a la falta de información suficiente para definir tanto la condición de frontera hidrodinámica como la condición de frontera para el transporte de sedimentos, en la zona de la intersección del Canal Cascajal con el Río Guayas, a pesar de haber presentado un volumen de control inicial, se decidió extender el modelo a todo el sistema (Estero Salado – Canal Cascajal – Río Guayas – Golfo de Guayaquil), como se muestra en la Figura 1.

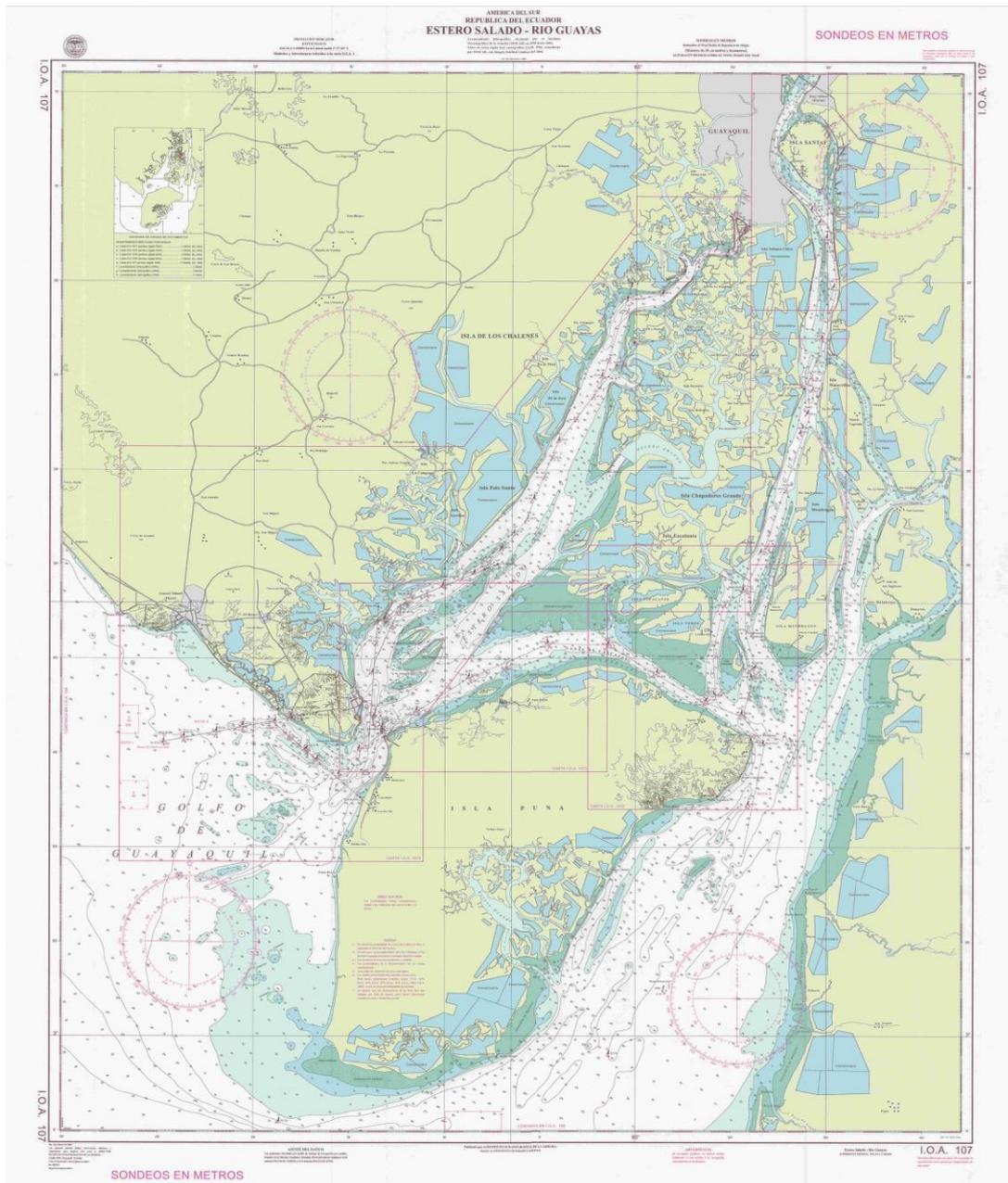
Nótese que la calidad y la cantidad de información en la zona del Río Guayas no es comparable con la que se dispone para el Estero Salado. Por ejemplo, no se cuenta con un levantamiento batimétrico reciente, no se tienen mediciones de nivel del agua,

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-9

ni de la velocidad de la corriente, ni con mediciones de sólidos en suspensión para calibrar el modelo.

No obstante lo anterior, es mejor extender el dominio espacial a todo el sistema, que idear la condición de frontera en la zona de la intersección del Canal Cascajal con el Río Guayas. Vale la pena indicar que existe una estación mareográfica en Puná Nuevo cerca de Punta Mandinga; sin embargo la accesibilidad a la información resultó compleja por los tiempos para acceder a ella, que rebasaban en mucho los plazos contractuales para desarrollar el Modelo, sin embargo se considera que lo ejecutado es válido.

**Figura 1. Localización del dominio de cálculo y delimitación del área de calibración.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-10

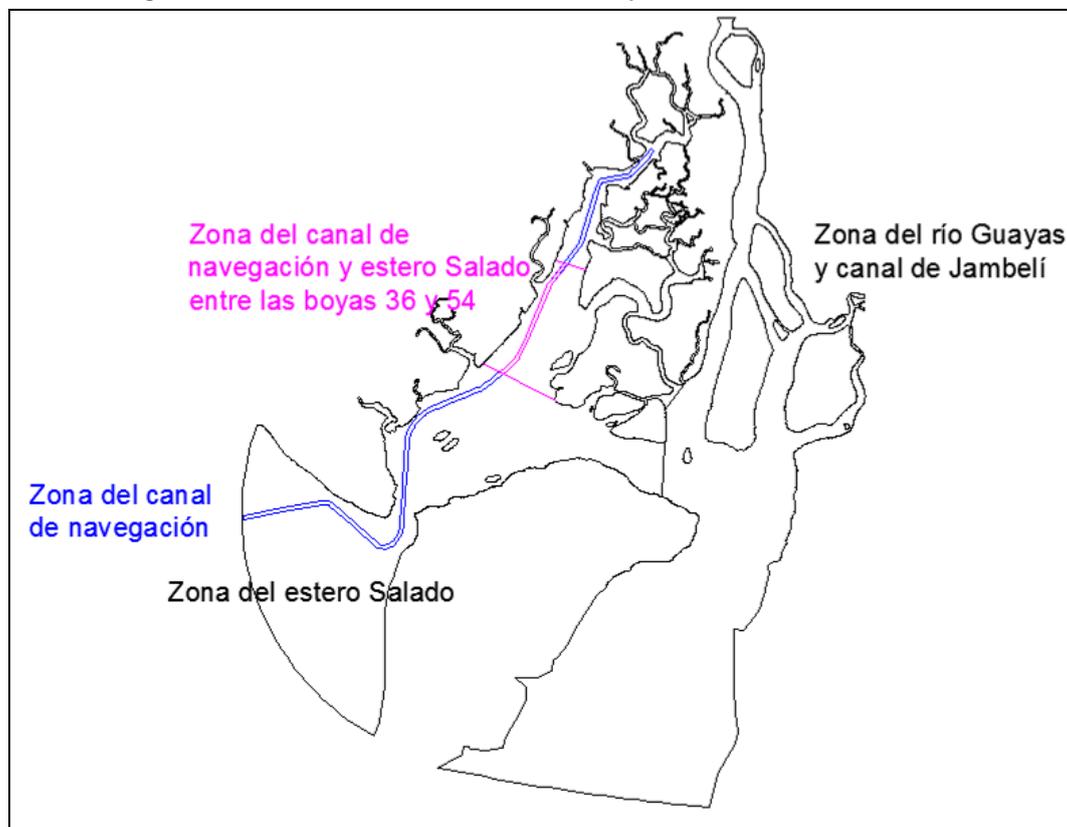
### 16.3.2.1. Malla

A fin de no perder precisión en el Canal de Navegación y en la configuración del estero, pero manteniendo el número de nodos de cálculo relativamente bajo, se discretizó el dominio espacial usando una malla no estructurada.

Para la construcción de la malla primero se eliminaron todos los canales que tuvieran un ancho menor a 150 m, pues éstos podrían generar celdas tan pequeñas que restringieran el tamaño del paso de tiempo.

El dominio de cálculo se dividió en 5 zonas para la construcción de la malla, a saber: 1) el canal de navegación, 2) el estero Salado (desde el Golfo de Guayaquil hasta el Puerto de Guayaquil), 3) la zona del canal de Jambelí y el río Guayas, 4) la zona del canal de navegación entre las boyas 36 y 54, y 5) la zona del estero Salado entre las boyas 36 y 54. Véase la Figura 2.

Figura 2. Definición de las cinco zonas utilizadas para la construcción de la malla.



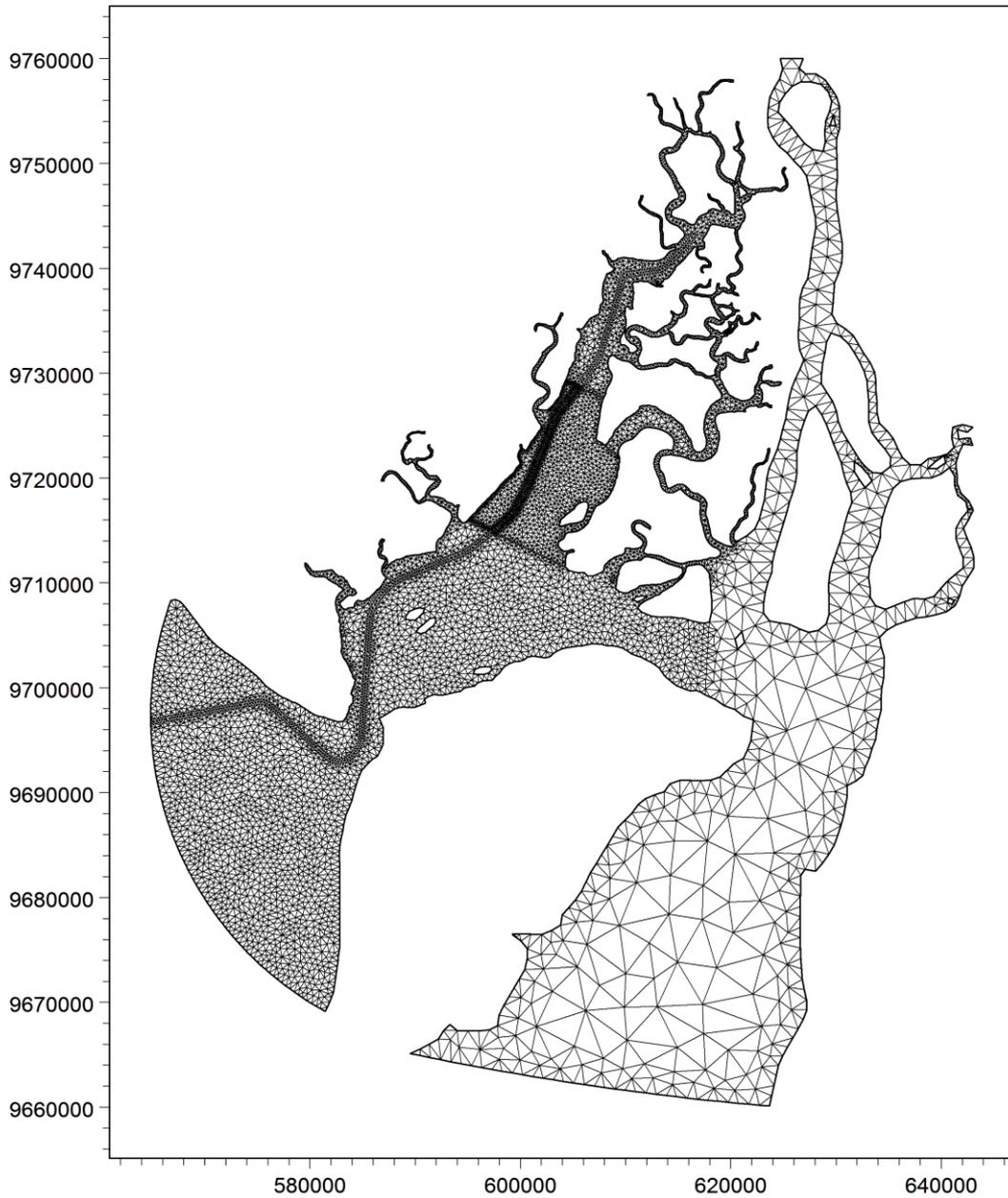
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En cada una de estas zonas se estableció un área máxima para los elementos de la malla. De esta forma, en la zona del canal de navegación, el área máxima para los elementos fue de 62.500 m<sup>2</sup>; en la zona del estero Salado, el área máxima para los elementos se estableció en 250.000 m<sup>2</sup>, en la zona de río Guayas y canal de Jambelí el área máxima se estableció en 16'000.000 m<sup>2</sup>. Por último en la zona del canal de navegación entre las boyas 36 y 54 el área dentro del canal se estableció en 30.000 m<sup>2</sup>, mientras que en el exterior del canal se estableció un área máxima de 125.000 m<sup>2</sup>.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-11

En siguientes figuras se muestra la malla resultante y algunos acercamientos.

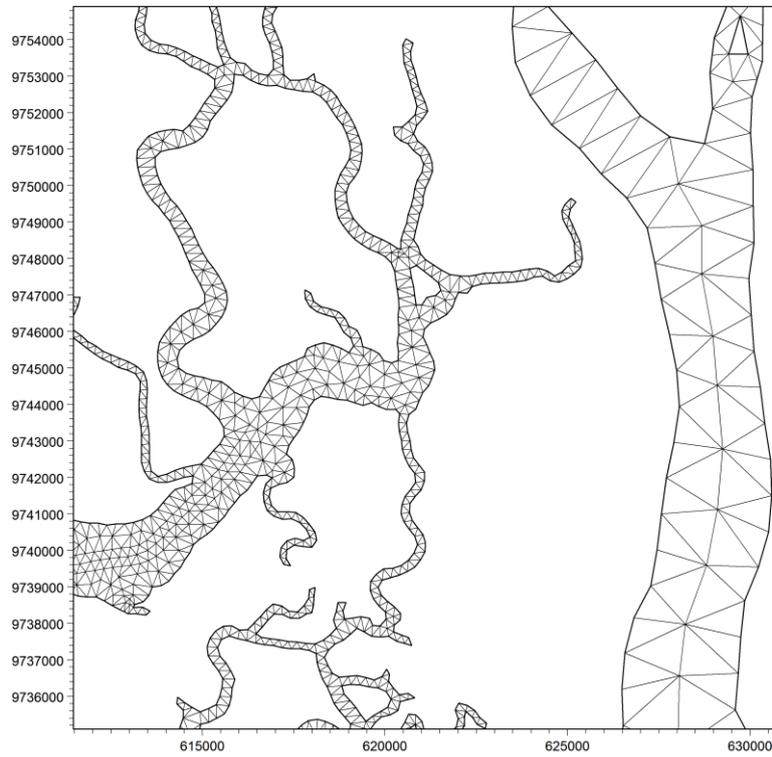
Figura 3. Discretización del Dominio Espacial (Estero Salado – Río Guayas) con malla no estructurada.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

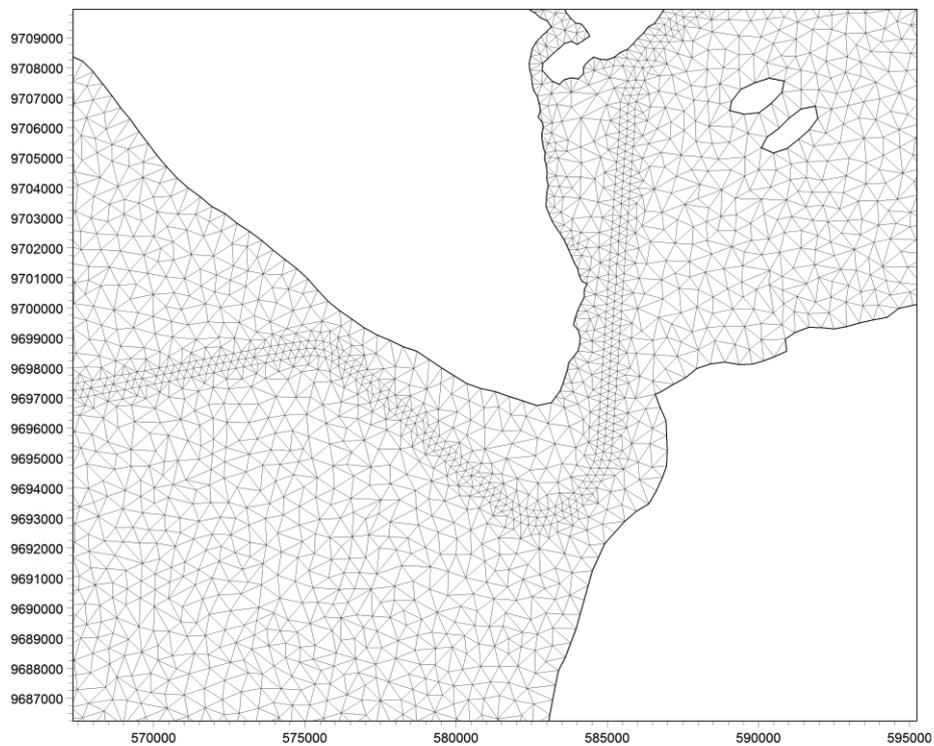
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-12

**Figura 4. Discretización del Dominio Espacial (Estero Salado – Río Guayas) con malla no estructurada. Acercamiento a la zona del Puerto de Guayaquil.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

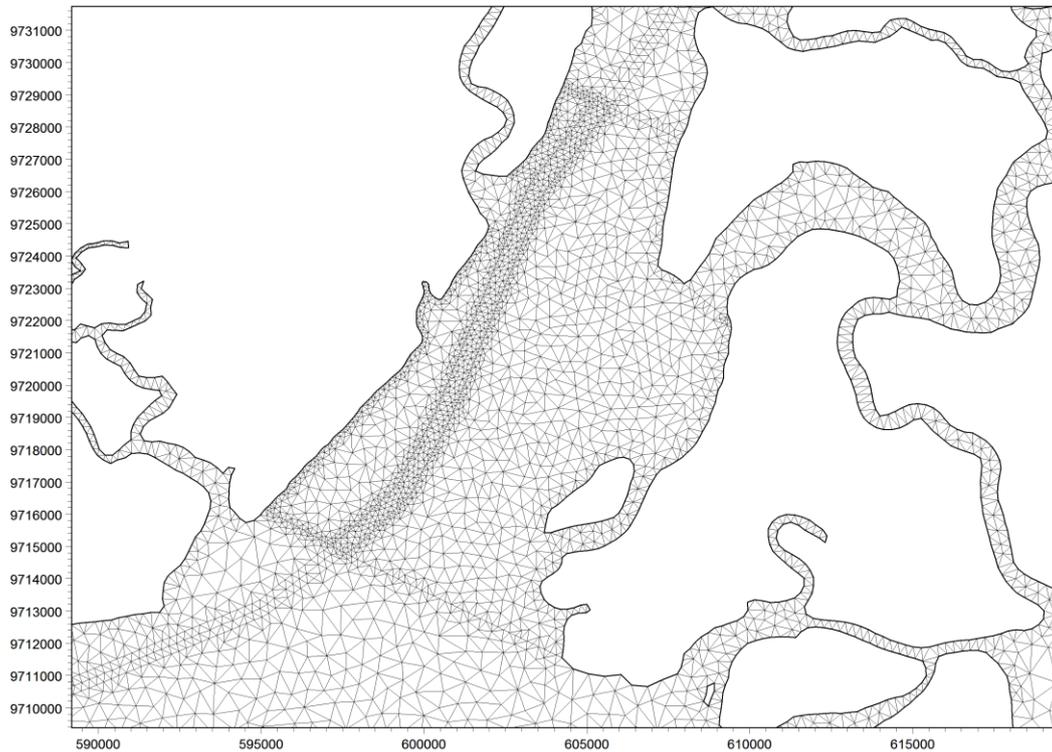
**Figura 5. Discretización del Dominio Espacial (Estero Salado – Río Guayas) con malla no estructurada. Acercamiento al canal del Morro.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-13

**Figura 6. Discretización del Dominio Espacial (Estero Salado – Río Guayas) con malla no estructurada. Acercamiento al Canal de navegación entre las boyas 36 y 54.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

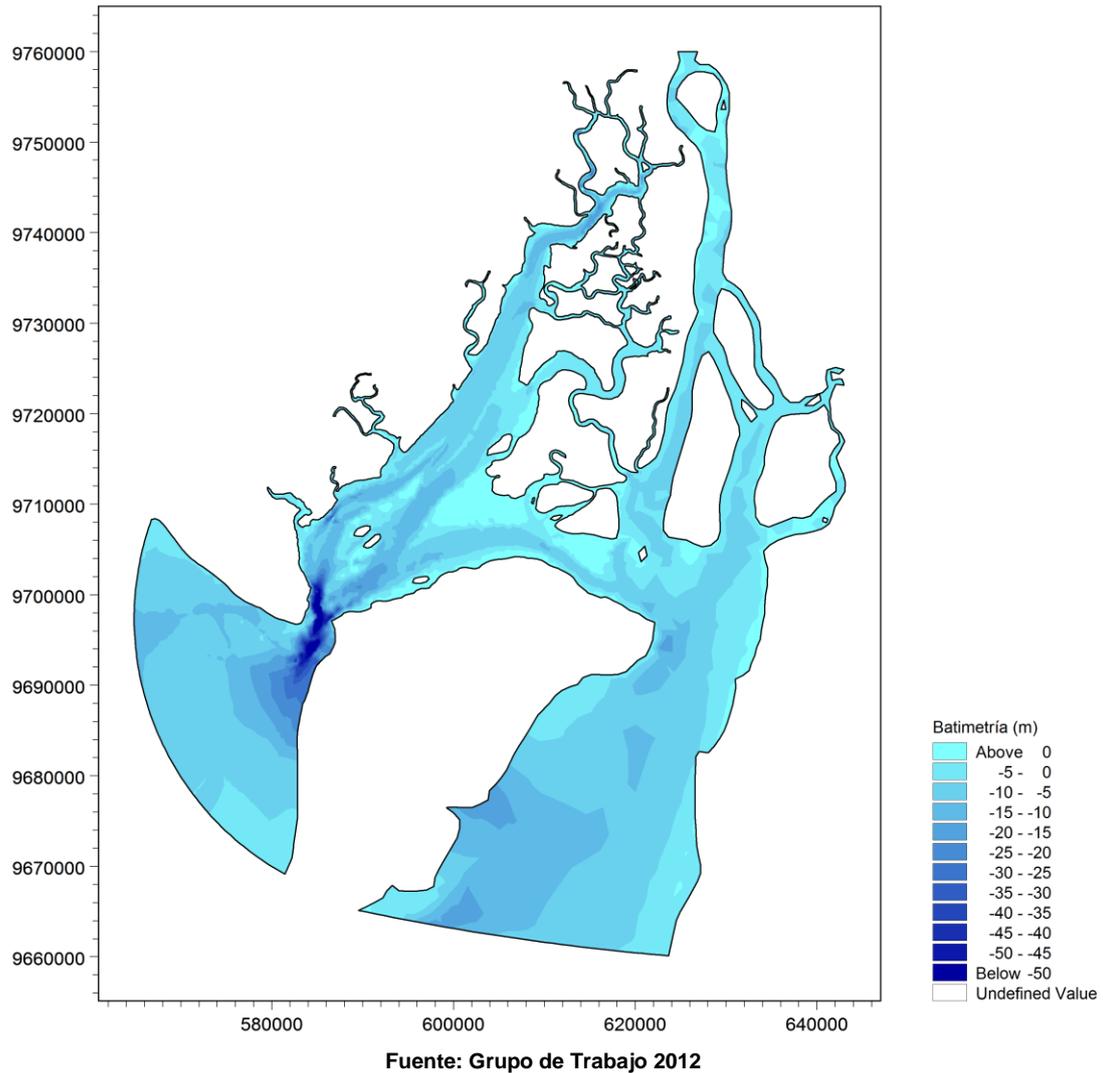
La malla tiene un total de 15.354 elementos triangulares y 9.516 nodos. El elemento más pequeño tiene un área de 1.187 m<sup>2</sup>.

### 16.3.2.2. Batimetría

Para la batimetría se utilizó el levantamiento de noviembre de 2010 (batimetria\_total\_georeferenciada\_2010\_2011[1].dwg) y para las zonas sin información se capturaron algunos puntos de las cartas náuticas IOA107PSAD56 y IOA107WGS84. Para los canales del interior del estero Salado se les asignó la cota 0 m y las zonas que se descubren en bajamar se les asignaron una cota de 2 m. La batimetría y algunos acercamientos se muestran a continuación.

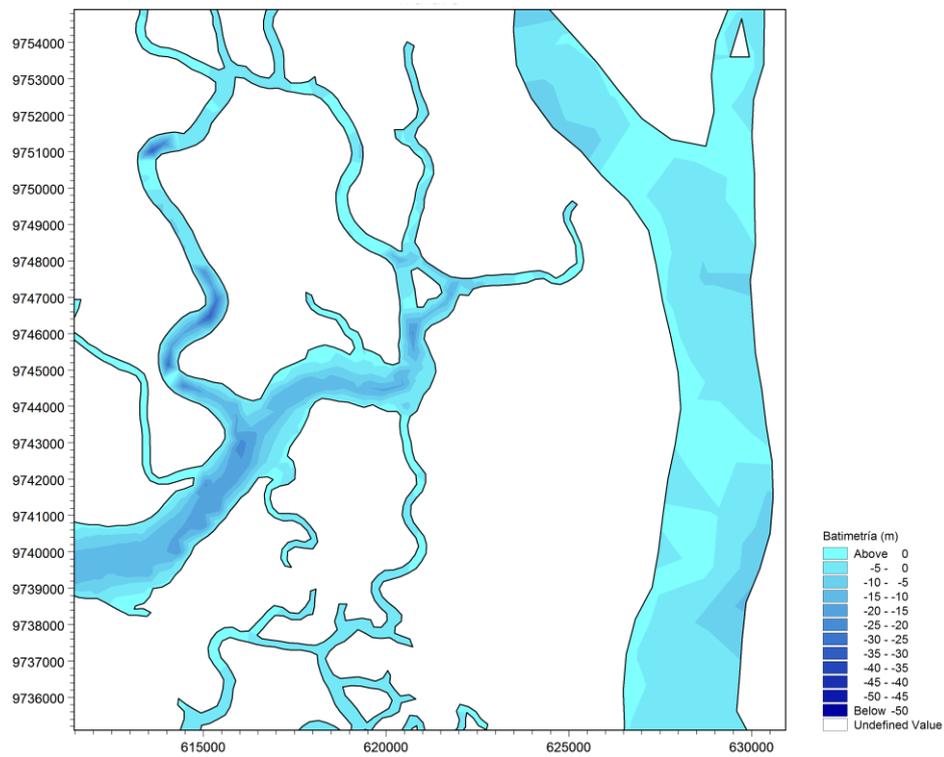
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-14

**Figura 7. Batimetría del dominio espacial de cálculo. La batimetría del Estero Salado y canal Cascajal corresponde al levantamiento de noviembre de 2010. La batimetría del Río Guayas y Golfo de Guayaquil corresponde a las cartas náuticas IOA107PSAD56 y IOA107WGS84.**



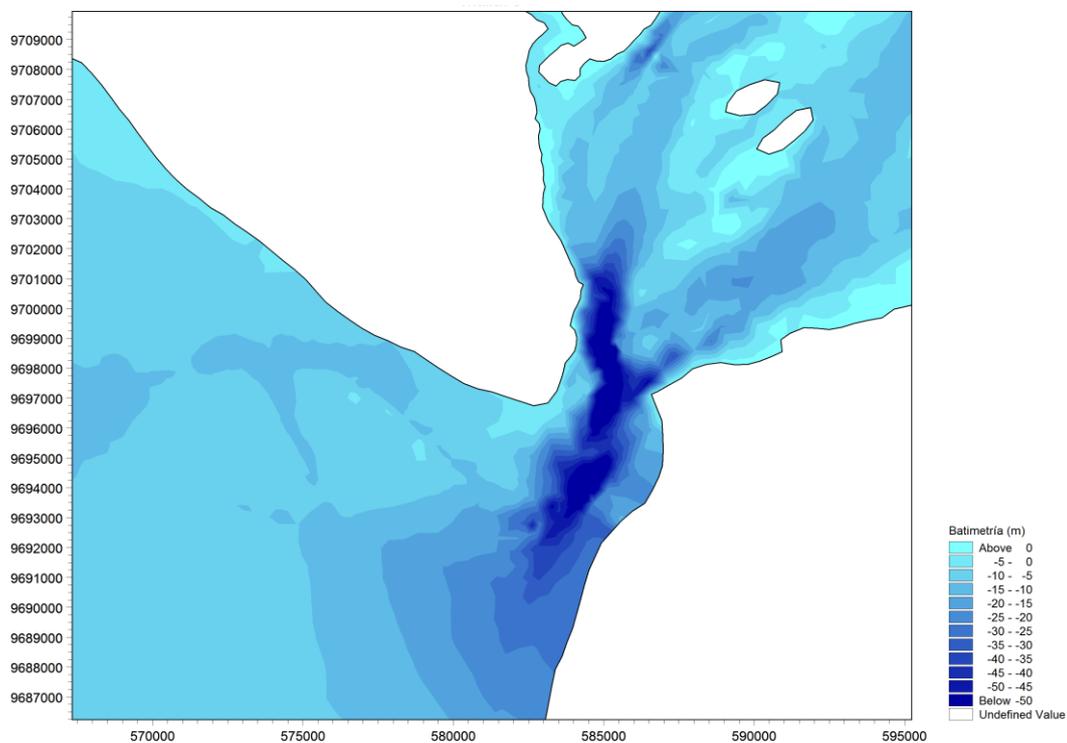
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-15

**Figura 8. Batimetría del dominio espacial de cálculo. Acercamiento al Puerto de Guayaquil.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

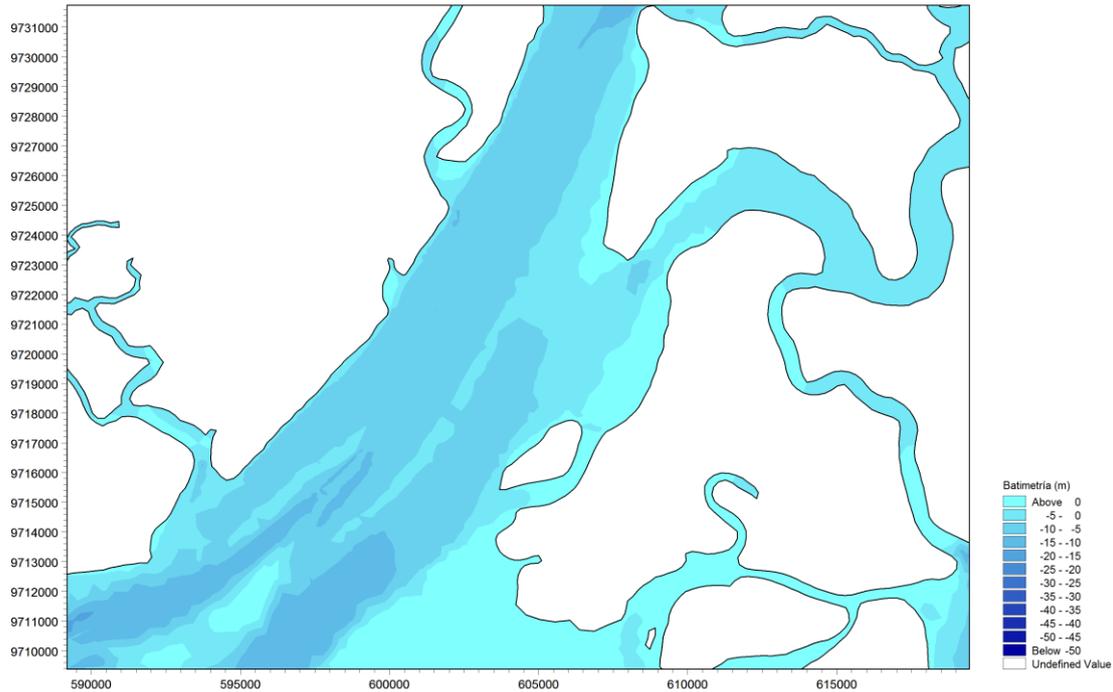
**Figura 9. Batimetría del dominio espacial de cálculo. Acercamiento al Canal del Morro.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-16

**Figura 10. Batimetría del dominio espacial de cálculo. Acercamiento al Canal de navegación entre las boyas 36 y 54.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

### 16.3.3. Dominio Temporal

Para el dominio temporal se utilizó el periodo del 18 al 26 de Enero de 2012, que forma parte de la etapa cálida y húmeda (Diciembre a Mayo), por disponer de la información de campo más completa (segunda campaña de medición en campo, ver capítulo 7), y porque en esa época por el arrastre de sedimentos debido a las lluvias se producen los mayores aportes sedimentarios.

### 16.3.4. Condiciones Iniciales

Como condiciones iniciales se supone que el dominio de cálculo se encuentra en reposo (mismo nivel en toda su extensión y velocidad cero), salinidad constante (misma concentración en toda su extensión) y concentración de sedimentos en suspensión constante (misma concentración en toda su extensión).

Dado que esta condición no es precisa, es necesario investigar el tiempo que se requiere para que la condición inicial no tenga efecto en los resultados de la modelación.

La condición inicial que se le impuso al modelo fue un nivel constante en 2.492 m (el cual corresponde al nivel en Posorja para el 18 de enero de 2012 a las 00:18 horas), temperatura de 20 °C, salinidad de 33 PSU y concentración de sólidos en suspensión de 0,5 kg/m<sup>3</sup>.

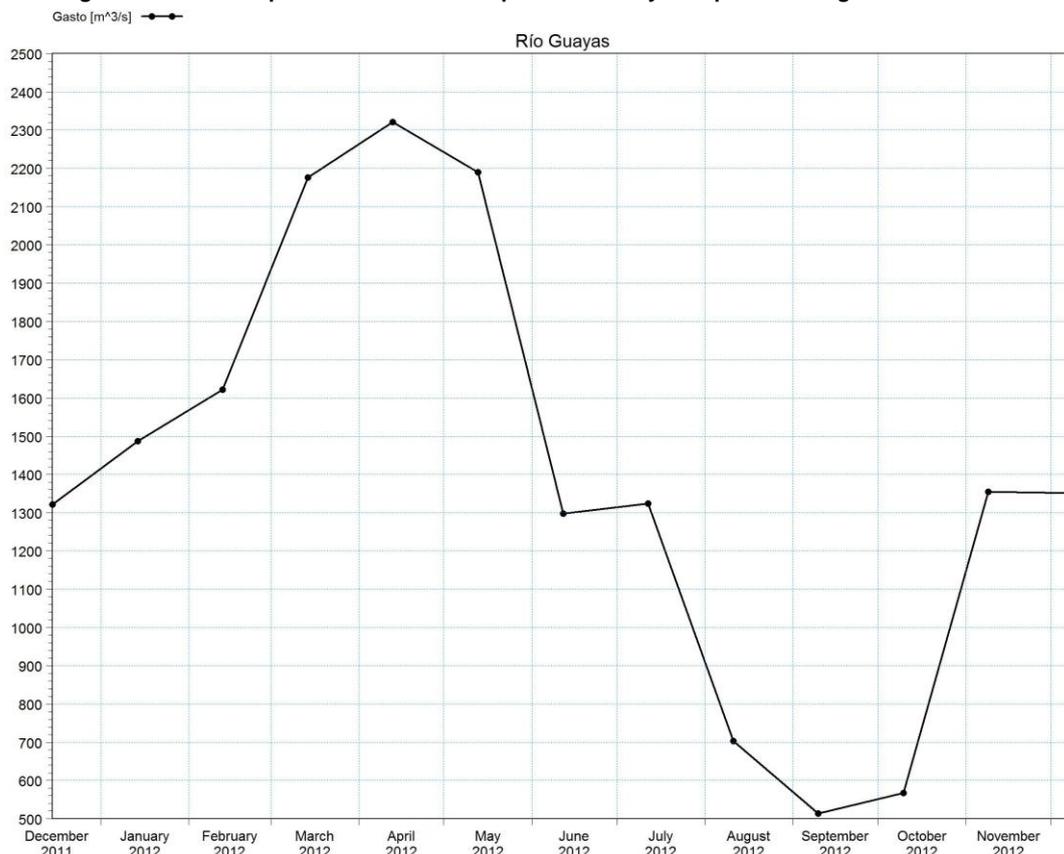
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-17

### 16.3.5. Condiciones de Frontera

El modelo cuenta con tres fronteras: una al norte por el Río Guayas y dos en el Golfo de Guayaquil, una por el lado del canal del Morro y otra por el lado del canal Jambelí.

En el Río Guayas se utiliza una frontera de caudal variable en el tiempo, salinidad y concentración de sólidos en suspensión constante. Debido a que no se cuenta con mediciones durante el dominio temporal utilizado, se utilizan los caudales promedios mensuales suponiendo regulado el Río Daule (ver inciso 7.3.2.3.5, Figura 8), salinidad 0 PSU y una concentración de sólidos en suspensión de 1,83 kg/m<sup>3</sup> (ver inciso 9.5.5).

**Figura 11. Caudales promedios mensuales por el Río Guayas suponiendo regulado el Río Daule.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En el Golfo de Guayaquil se utiliza una frontera de nivel variable, salinidad constante de 33 PSU y concentración de sólidos en suspensión constante e igual a 0 kg/m<sup>3</sup>. Debido a que no se cuenta con mediciones de marea en el Golfo de Guayaquil, se realizó un ajuste a las mediciones de marea en Posorja.

### 16.4. Análisis de la información

Durante el mes de Enero de 2012 se llevó a cabo la 2ª campaña de mediciones en el Estero Salado, durante la cual se midieron niveles, corrientes (velocidad y dirección), salinidad, temperatura y concentración de sólidos en suspensión.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-18



Los niveles fueron medidos con 3 mareógrafos instalados en el Puerto Posorja, en la Enfilada C2 y en el Puerto de Guayaquil.

Las corrientes fueron medidas con dos equipos, S4 y ADCP en 11 estaciones. El equipo S4 mide a una sola profundidad (velocidad, dirección de la corriente, temperatura del agua y salinidad), según su instalación, mientras que el ADCP mide la velocidad en toda la columna de agua (velocidad y dirección de la corriente).

La composición del fondo fue medida con 30 sondeos utilizando la draga Van Veen a lo largo del canal de navegación; mientras que la concentración de sólidos en suspensión se midió en 4 estaciones con la botella Van Dorn.

Para estimar la tasa de azolvamiento en el canal de navegación se empleó información de las batimetrías de post dragado y batimetrías de comprobación realizadas por la Fiscalización del Dragado de Mantenimiento entre Marzo 2009 y Febrero 2011, abarcando las áreas comprendidas entre la Boya 37 hasta la Boya 45; de la Boya 44 a la Boya 51 y de la Boya 44 a la Boya 45.

#### 16.4.1. Niveles

Los niveles medidos con los tres mareógrafos durante el dominio temporal de cálculo se muestran en la Figura 12. La amplitud y nivel promedio en cada estación se muestra en la Tabla 1.

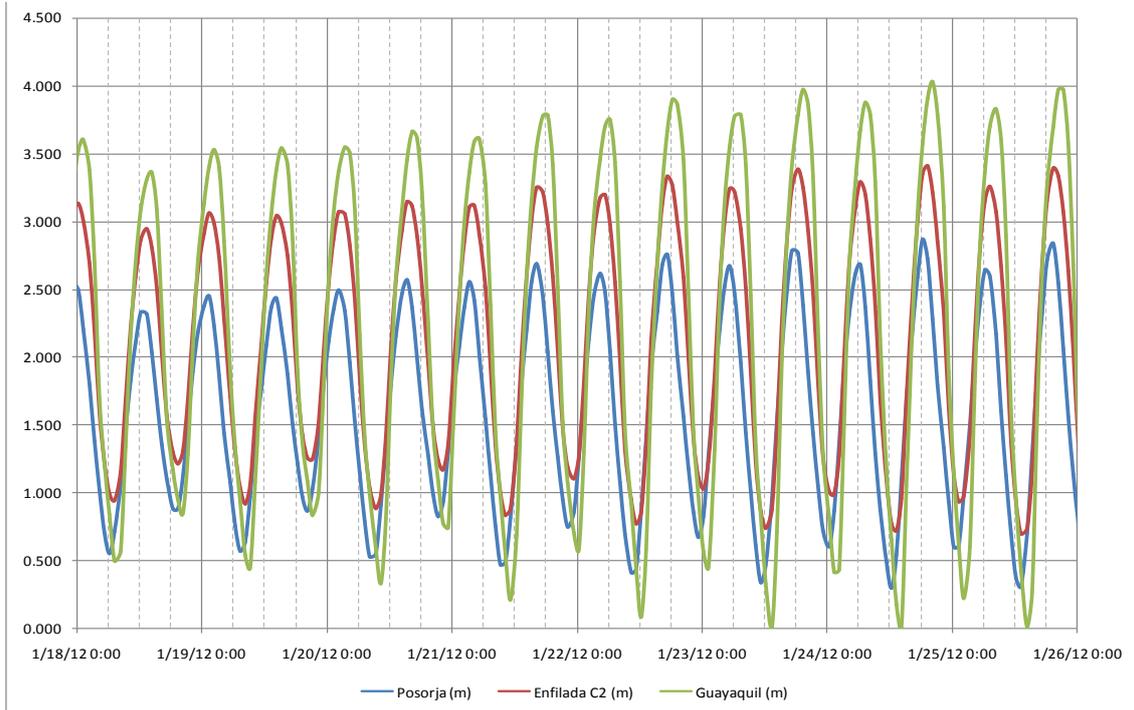
Según esta información, el nivel medio del agua en la estación de la Enfilada C2 se encuentra 0,511 m por arriba del nivel medio del agua en la estación Posorja, mientras que el nivel medio del agua en el Puerto se encuentra 0,091 m por arriba del nivel medio del agua en la estación Enfilada.

Obsérvese también que la amplitud de la onda de marea se incrementa en la medida que se interna en el Estero Salado. En Posorja la amplitud de la marea es de 2,6 m, mientras que en Enfilada de 2,7 m (6% mayor) y en el Puerto de Guayaquil de 4,0 m (48% mayor).

Utilizando los niveles medidos en el puerto de Posorja y en la Enfilada C2 se calcula la pendiente hidráulica entre ambas estaciones, ver Figura 13. Obsérvese que la pendiente hidráulica oscila entre +/- 20,0E-6 durante el 19 de enero y entre +/- 30,0E-6 durante el 24 de enero.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-19

Figura 12. Elevación de la superficie libre del agua en tres puntos del Estero Salado: Posorja, Enfilada y Puerto.



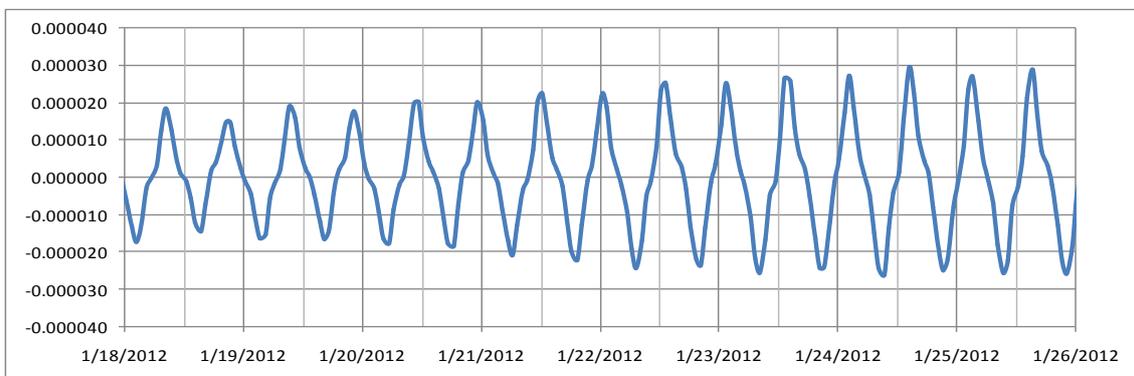
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Tabla 1. Estadísticas de los niveles medidos en las estaciones mareográficas Posorja, Enfilada y Puerto.

	Posorja (m)	Enfilada C2 (m)	Guayaquil (m)
<b>Promedio</b>	<b>1,604</b>	<b>2,114</b>	<b>2,205</b>
MAX	2,866	3,406	4,026
MIN	0,295	0,693	0,005
<b>Amplitud</b>	<b>2,571</b>	<b>2,713</b>	<b>4,021</b>

Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Figura 13. Pendiente hidráulica medida entre Posorja y Enfilada C2.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

## 16.4.2. Corrientes

Se utilizó un perfilador Doppler (ADCP) para la medición de la corriente (intensidad y dirección) en la vertical. En las figuras que se muestran a continuación se incluyen varias gráficas para cada estación: a) la intensidad de la corriente en superficie, al fondo y el promedio de la vertical, a lo largo del tiempo; b) la dirección de la corriente a media profundidad (3,4 m de profundidad en la mayoría de los casos) a lo largo del tiempo; la variación de la marea en un punto cercano; y el perfil de velocidad (intensidad y dirección) a la hora del flujo y reflujo.

Obsérvese en la Figura 14 que las velocidades en la estación EHS01 no exceden los 0,90 m/s; que las velocidades durante el reflujo son mayores y más estables (poca variación en la dirección de la corriente) que durante el flujo; que el perfil de velocidades en superficie y fondo son ligeramente diferentes; durante el reflujo la dirección de la corriente en el fondo puede diferir a la de la superficie hasta en 60°.

En la estación EHS02 (Figura 15) las velocidades son ligeramente mayores, pero mucho más estables que en la estación EHS01 (Canal del Morro). Al igual que en la estación EHS01, las velocidades durante el reflujo son mayores que durante el flujo.

Nótese que las velocidades en la estación EHS03 (Figura 16) son mayores que en las estaciones EHS01 y EHS02, alcanzando valores hasta de 1,20 m/s. La dirección de la velocidad durante el reflujo es mucho más estable que durante el flujo. Obsérvese en el perfil de velocidades que la dirección de la corriente es muy similar en toda la profundidad y que la diferencia de velocidad entre la superficie y el fondo es más marcada durante el flujo que durante el reflujo.

En la estación EHS05 (Figura 17) la velocidad de la corriente puede alcanzar valores hasta de 1,80 m/s, por arriba de las estaciones anteriores. Obsérvese en el perfil de velocidades que la dirección de la corriente es muy similar en toda la profundidad y que la diferencia de velocidad entre la superficie y el fondo es más marcada durante el flujo que durante el reflujo. Durante el reflujo las velocidades en el fondo son más altas que durante el flujo.

En la estación EHS06 (Figura 18) la velocidad de la corriente es del mismo orden que en la estación EHS03 (0,90 y 1,20 m/s, dependiendo de la fase de la marea). Obsérvese que las velocidades durante el reflujo son mayores a las que se presentan durante el flujo; la dirección de la corriente es muy estable tanto en el flujo como en el reflujo; en el perfil de velocidades que la dirección de la corriente es muy similar en toda la profundidad y que la distribución de velocidades en la vertical se asemeja más a un perfil logarítmico que en las estaciones anteriores.

En la estación EHS07 (Figura 19) la velocidad de la corriente es del mismo orden que en las estaciones EHS03 y EHS06 (0,90 y 1,20 m/s, dependiendo de la fase de la marea). Obsérvese que las velocidades durante el reflujo son mayores a las que se presentan durante el flujo; la dirección de la corriente es muy estable tanto en el flujo como en el reflujo.

En la estación EHS08 (Figura 20) la velocidad de la corriente es del mismo orden que en las estaciones EHS03 y EHS06 (0,90 y 1,20 m/s, dependiendo de la fase de la marea), pero aquí las velocidades durante el reflujo son ligeramente menores a las

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-21



que se presentan durante el flujo; la dirección de la corriente es muy estable tanto en el flujo como en el refluo. En el perfil de velocidad se observa que la diferencia entre superficie y fondo se acentúan durante el flujo.

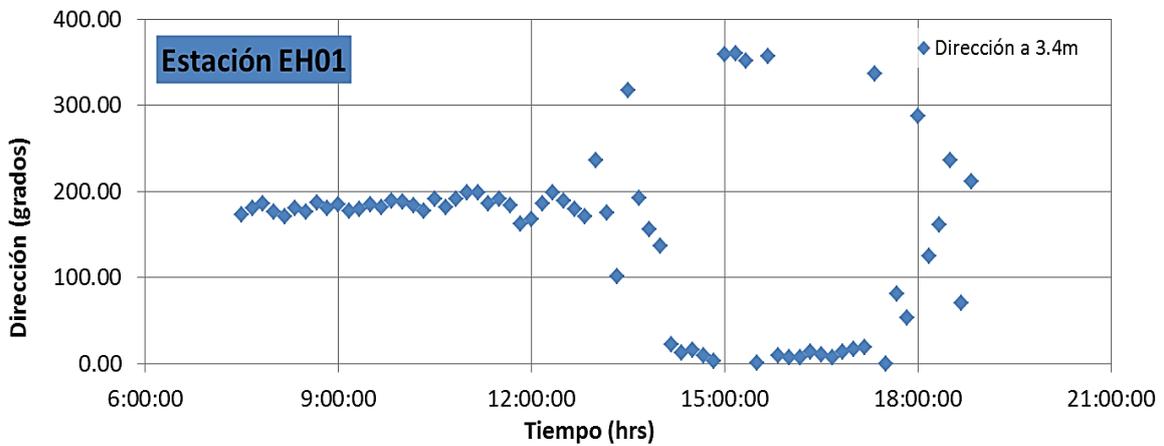
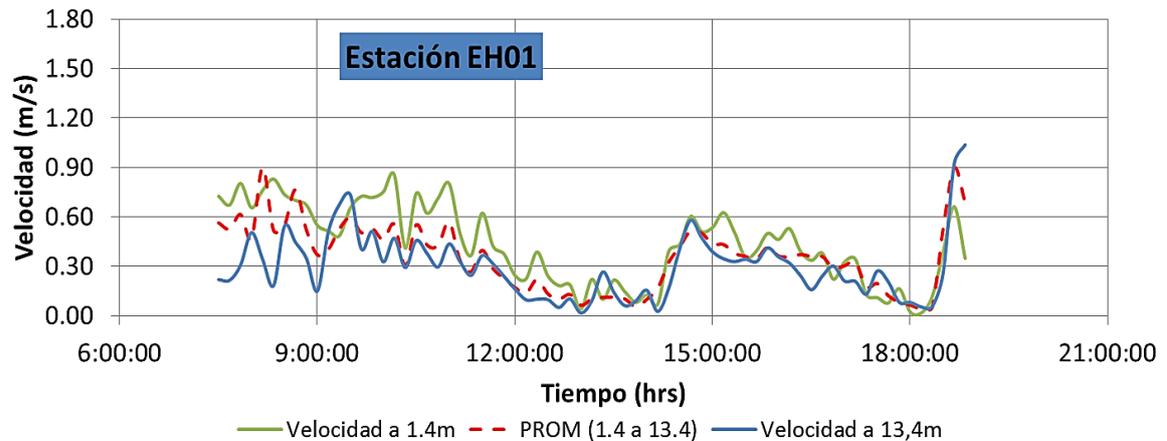
En la estación EHS09 (Figura 21) la velocidad de la corriente disminuye ligeramente durante el flujo, comportándose de manera similar tanto en el flujo como en el refluo (0,90 m/s); la dirección de la corriente es muy estable tanto en el flujo como en el refluo. En el perfil de velocidad se observa que la diferencia entre superficie y fondo se acentúan durante el flujo.

Finalmente, en la estación EHS10 (Figura 22) la velocidad de la corriente disminuye aún más, pero ahora durante el refluo, comportándose nuevamente de manera diferente en el flujo que en el refluo; la dirección de la corriente sufre cambios importantes, durante el flujo como en el refluo. La velocidad del fondo se aparta notoriamente del comportamiento de la capa superior. En el perfil de velocidad se observa que la diferencia entre superficie y fondo se acentúan durante el flujo.

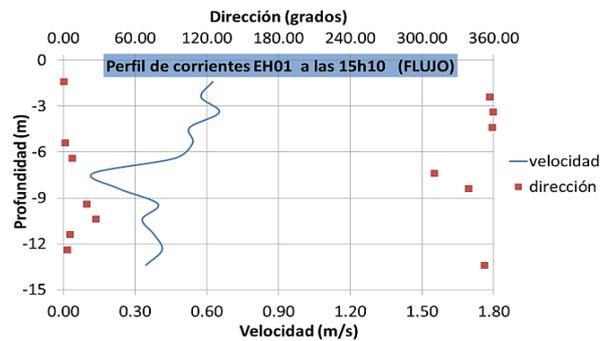
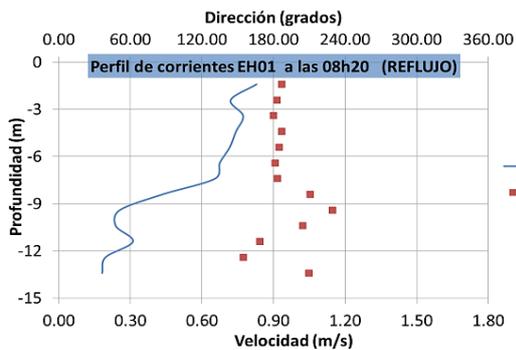
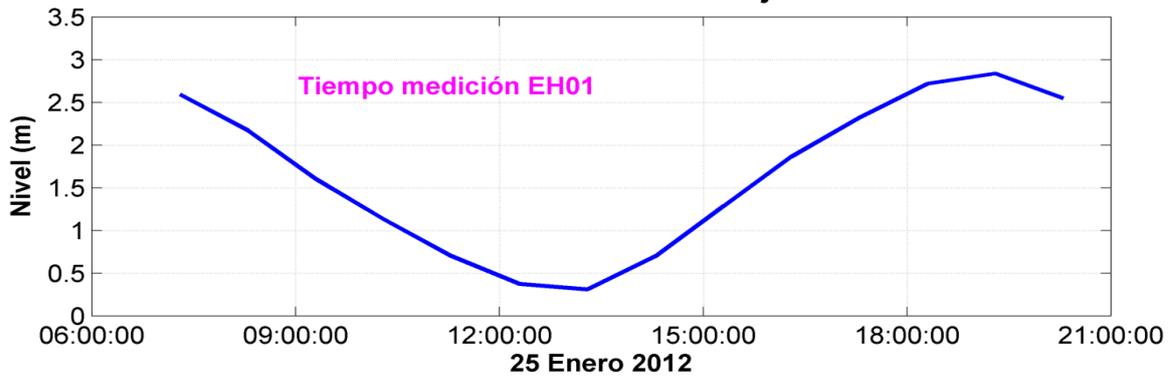
Resumiendo, dentro del Estero Salado la velocidad de la corriente es diferente en el flujo que en el refluo (excepto EHS09, donde el comportamiento es muy similar). A la entrada del estero (EHS01, EHS02, EHS03, EHS06 y EHS07) las velocidades durante el refluo son mayores que durante el flujo. En contraste, en la parte interna del estero (EHS08, EHS09 y EHS10) las velocidades durante el flujo son mayores que en el refluo. Las velocidades en el Canal Cascajal son mayores que en el Estero Salado.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-22

Figura 14. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS01.



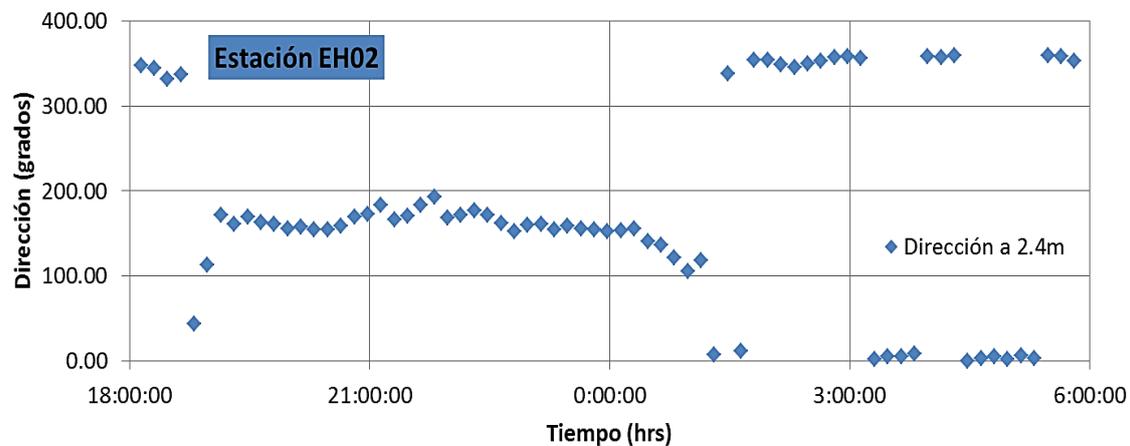
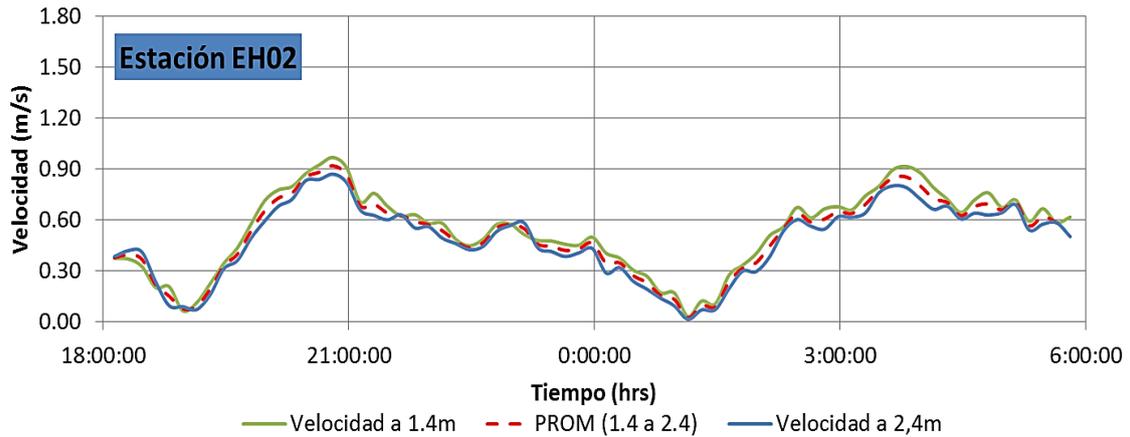
**Nivel de mareas: Posorja**



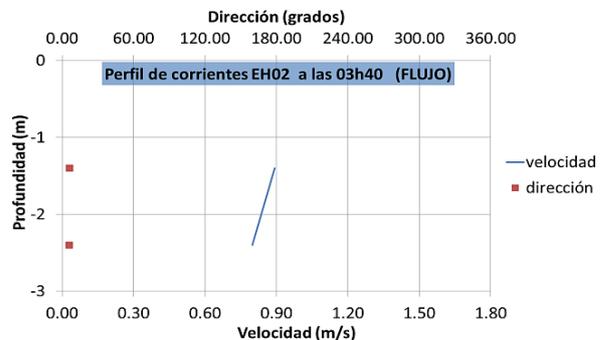
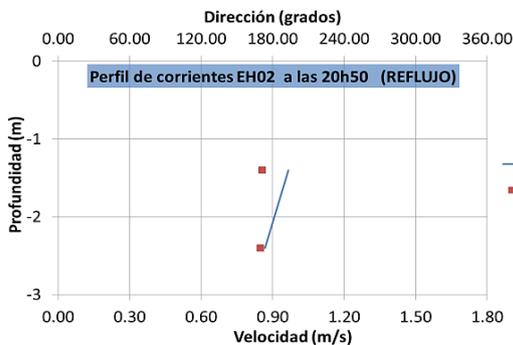
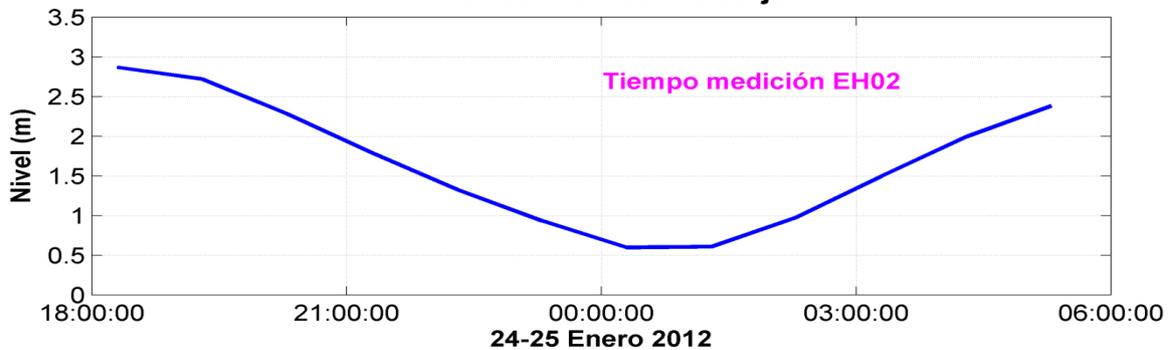
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultoría	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-23

Figura 15. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS02.



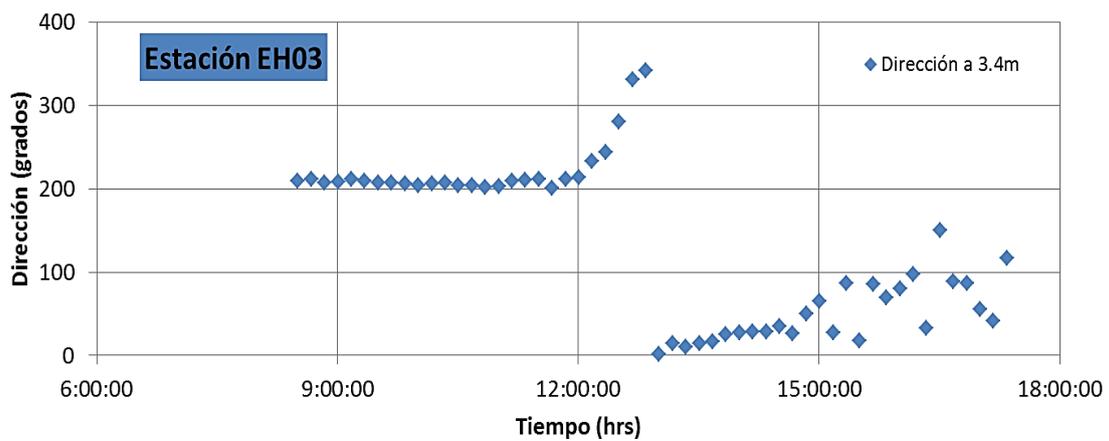
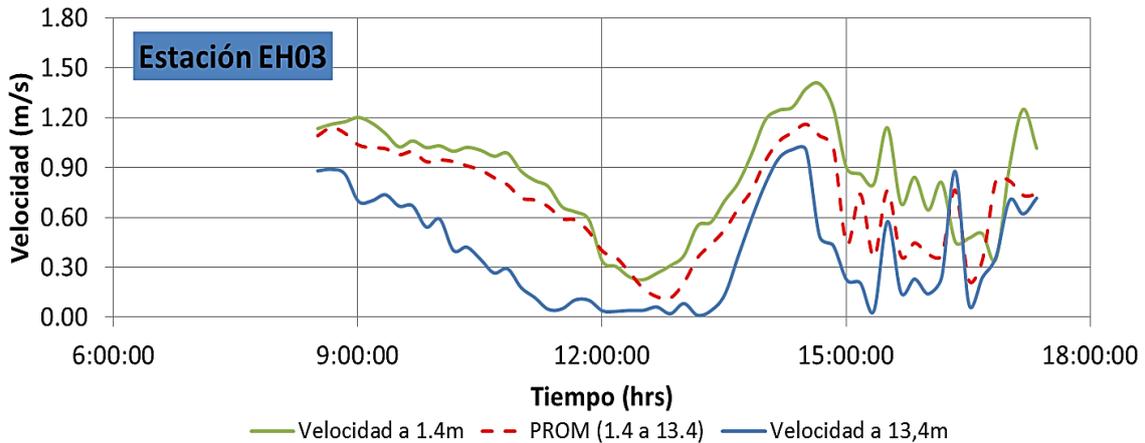
**Nivel de mareas: Posorja**



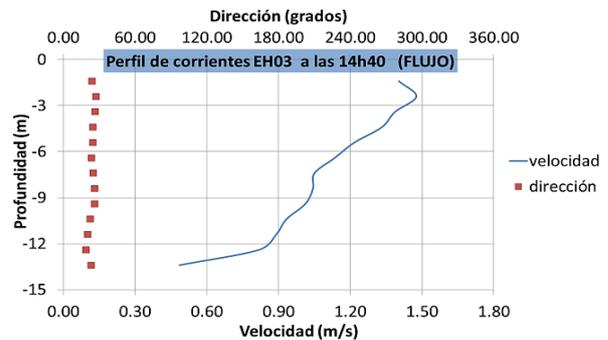
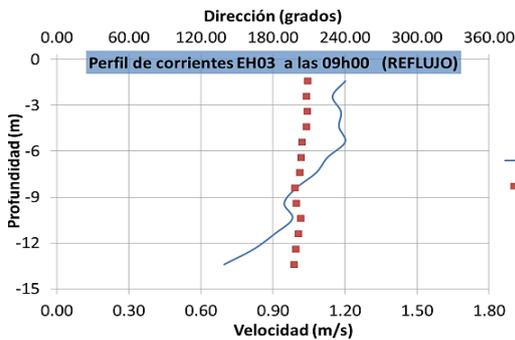
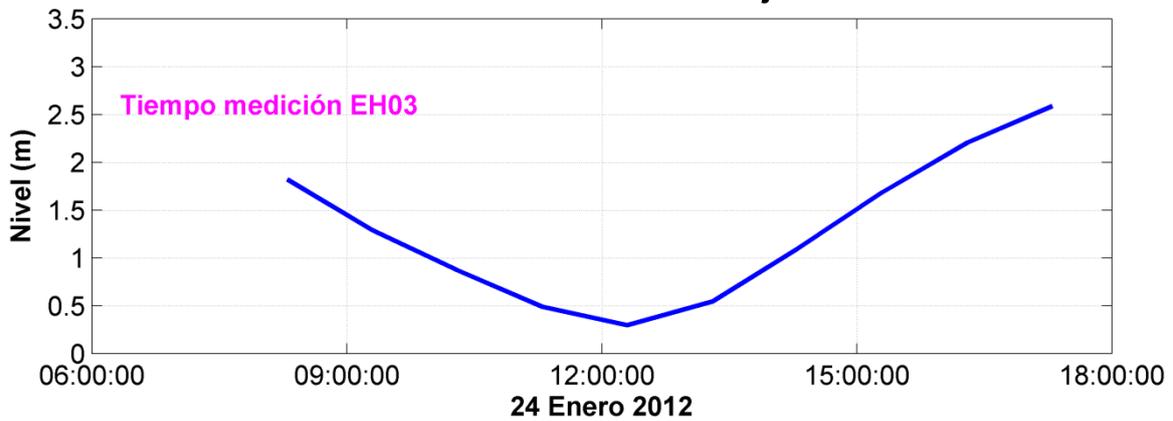
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-24

Figura 16. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS03.



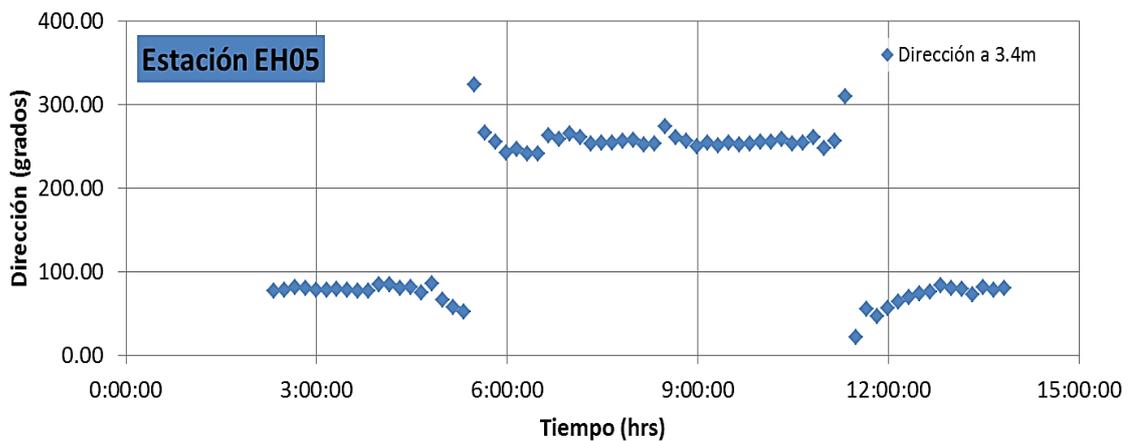
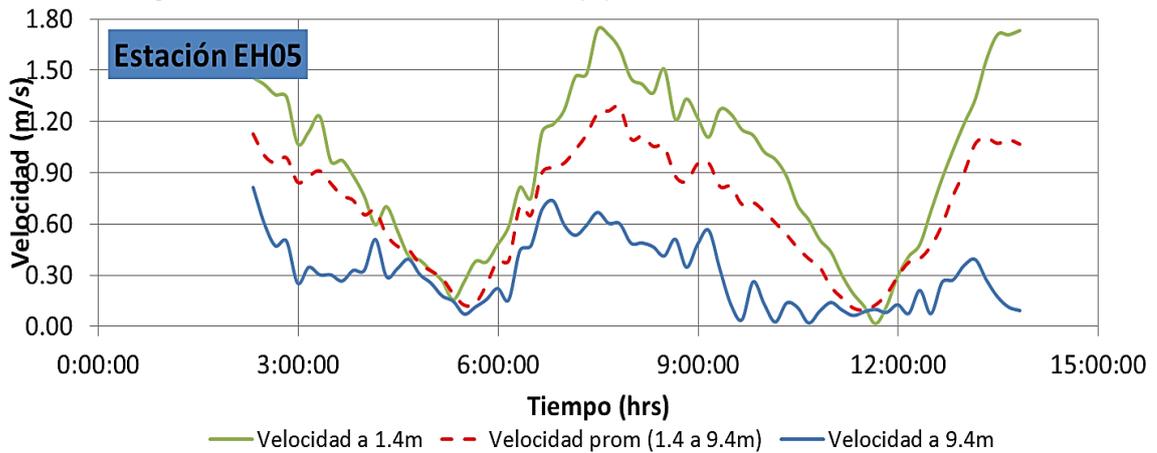
**Nivel de mareas: Posorja**



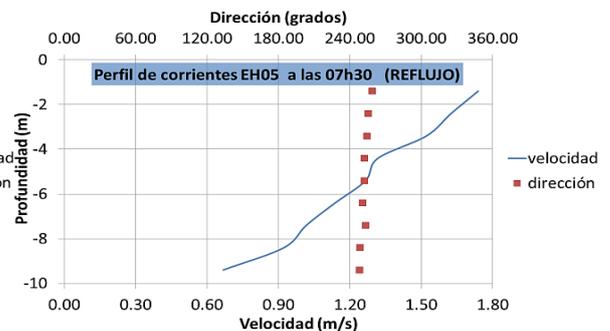
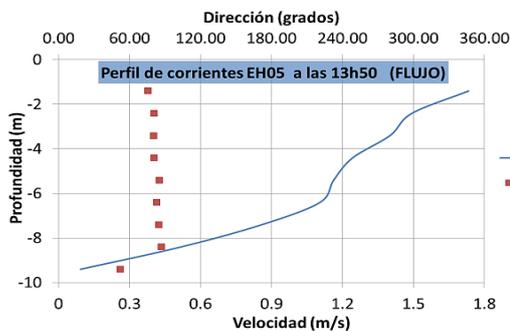
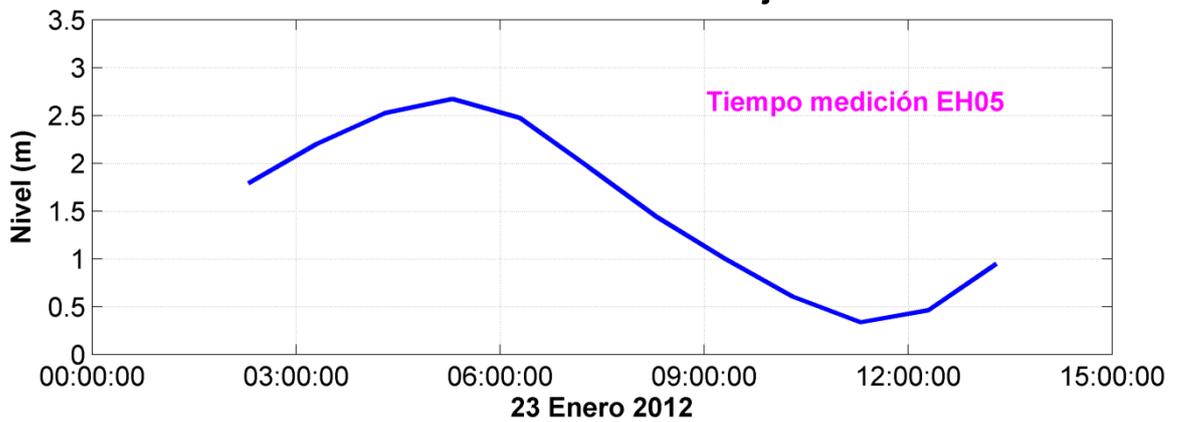
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-25

Figura 17. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS05.



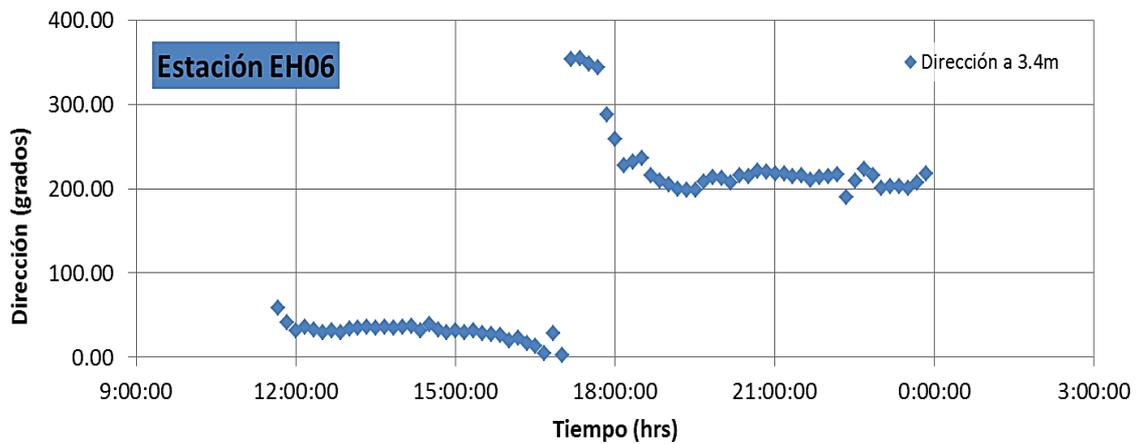
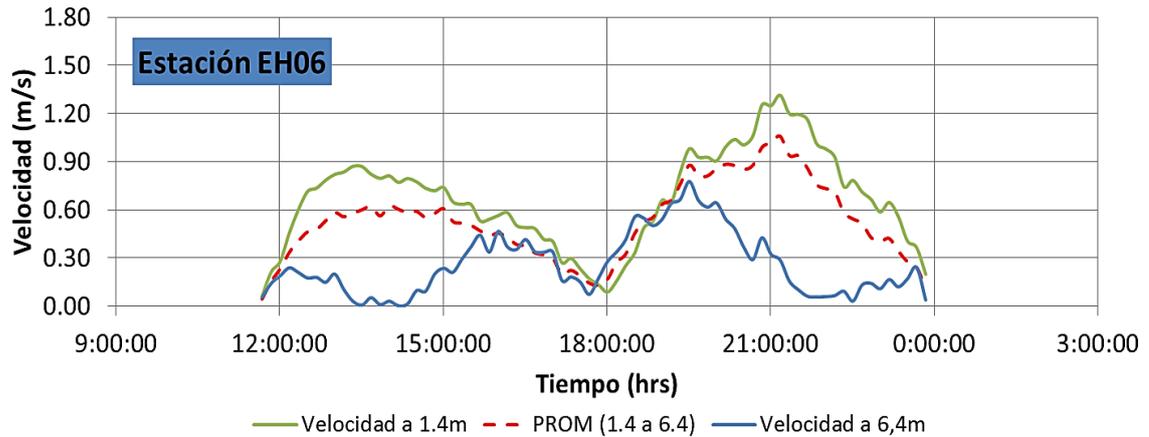
**Nivel de mareas: Posorja**



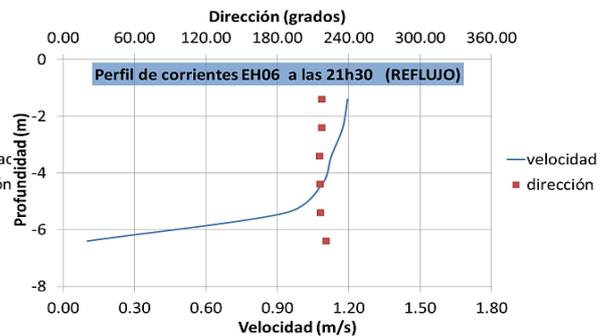
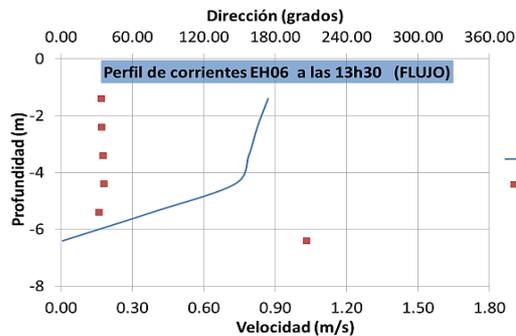
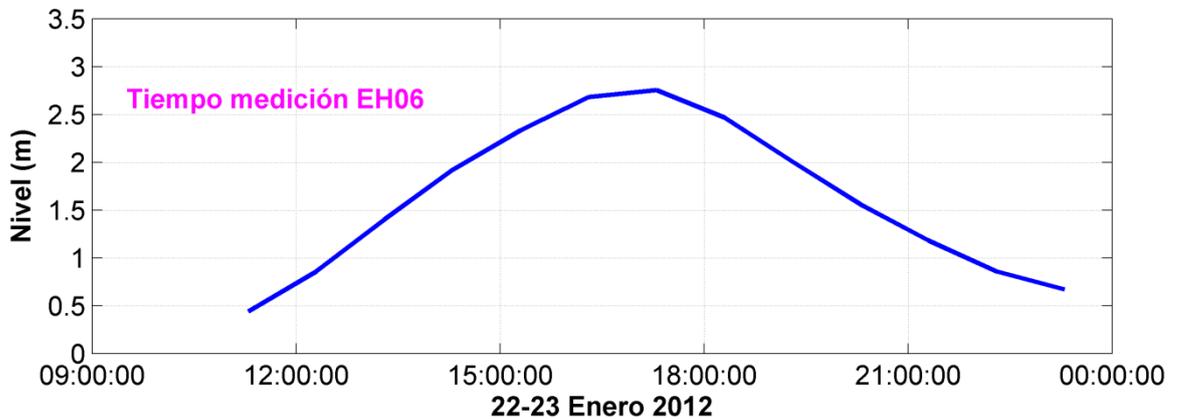
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-26

Figura 18. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS06.



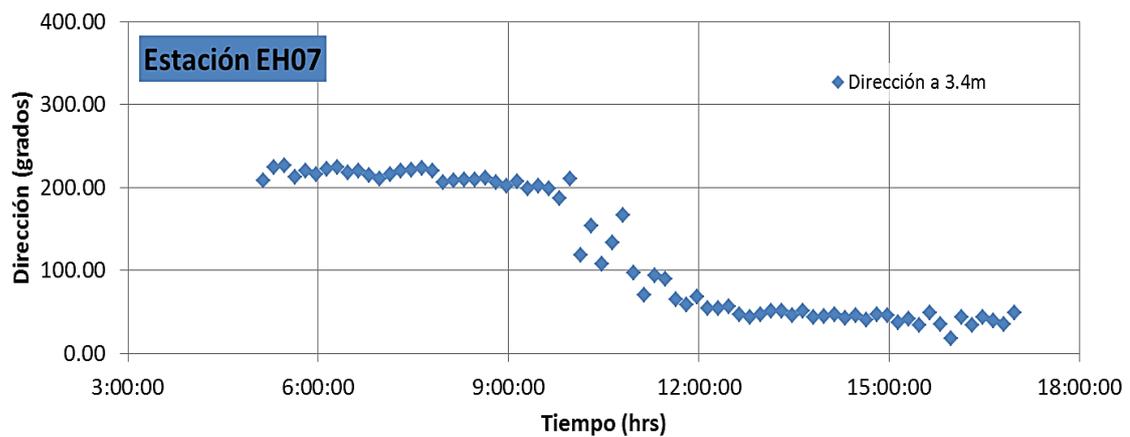
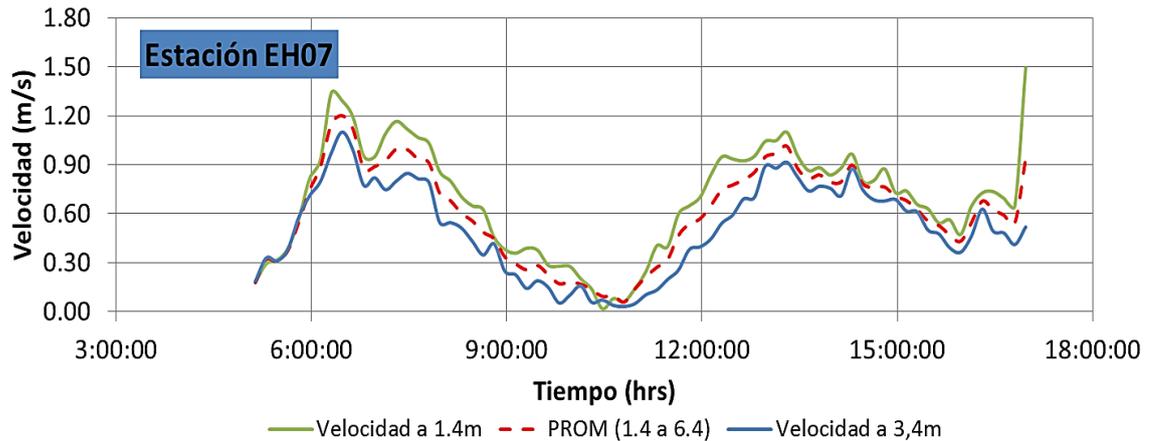
Nivel de mareas: Enfilada C2



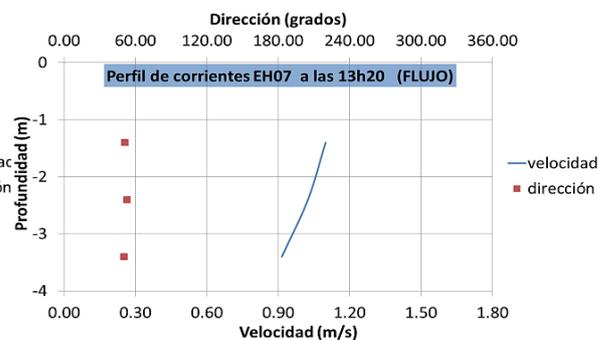
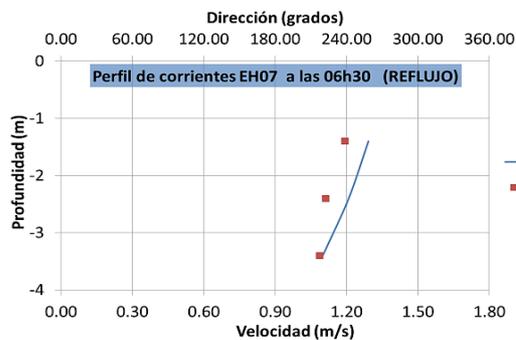
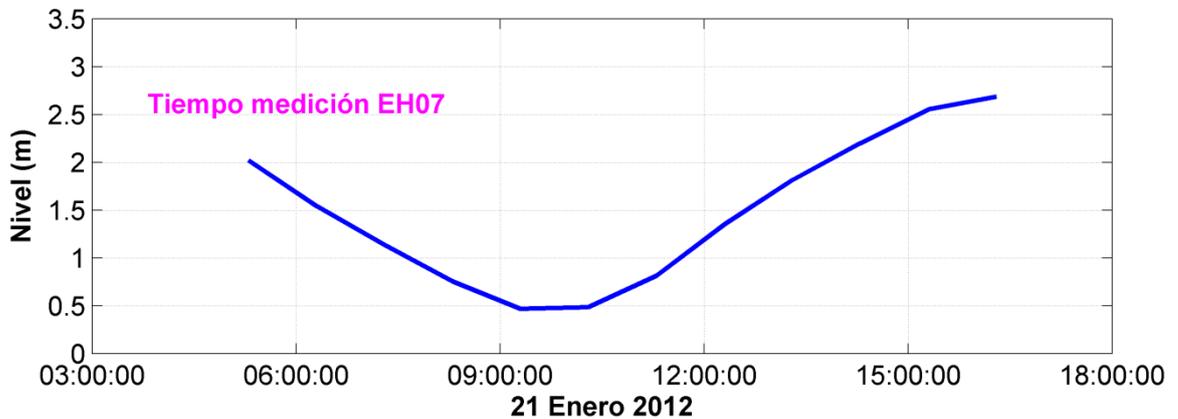
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-27

Figura 19. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS07.



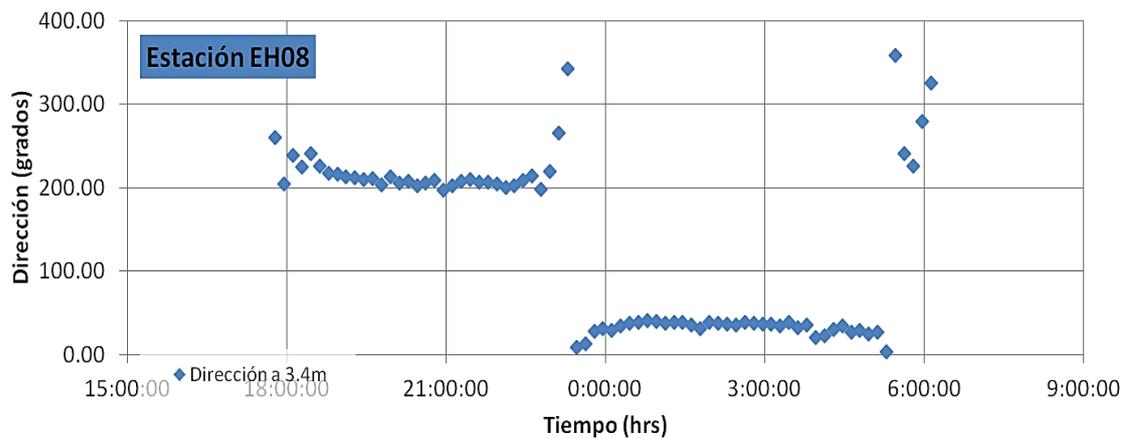
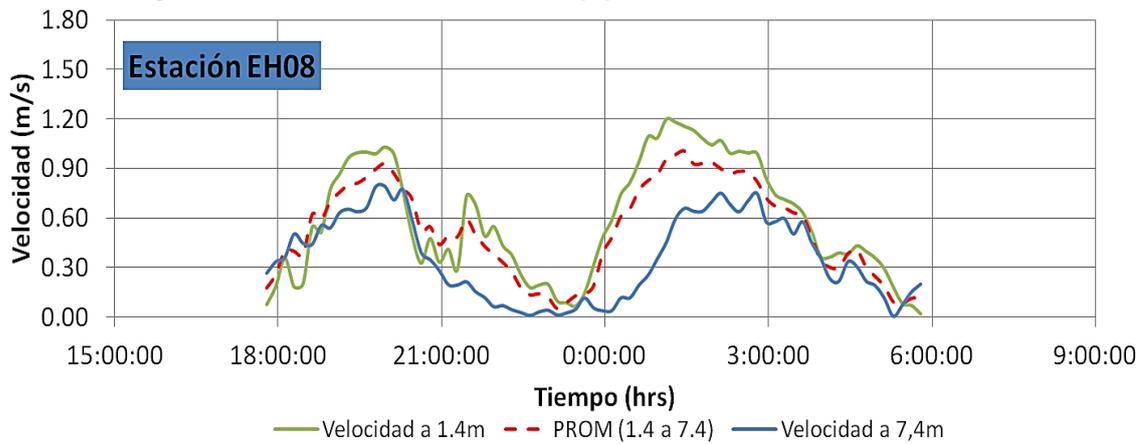
**Nivel de mareas: Enfilada C2**



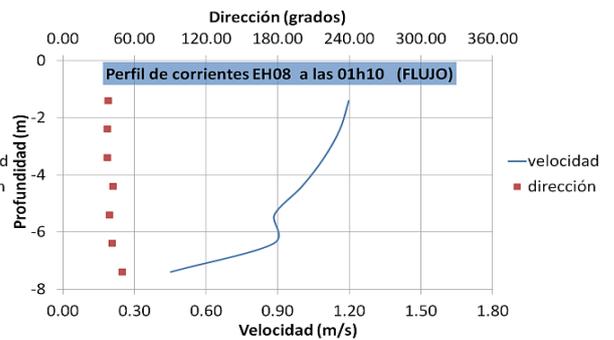
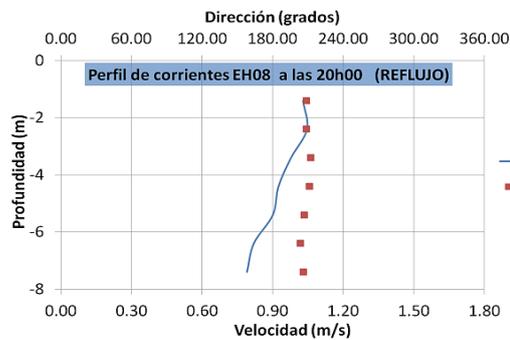
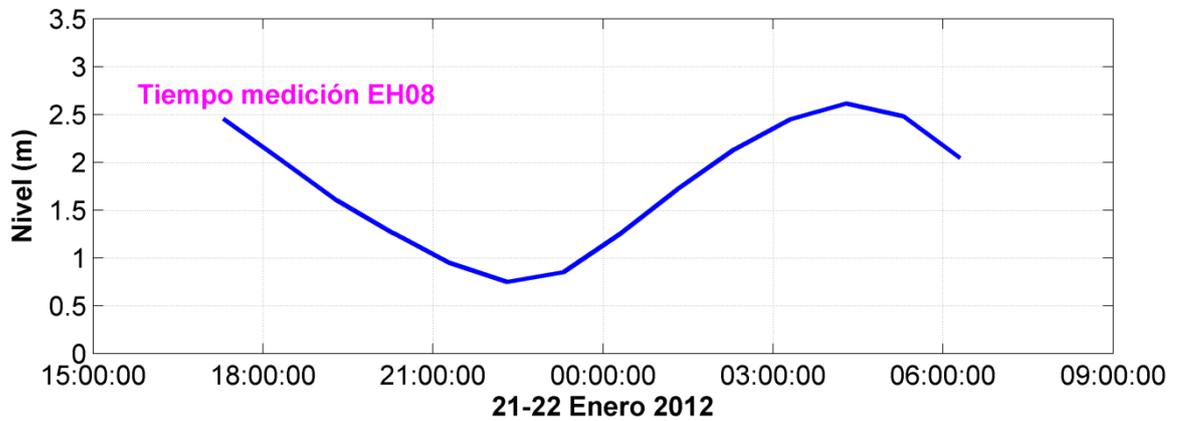
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultoría	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-28

Figura 20. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS08.



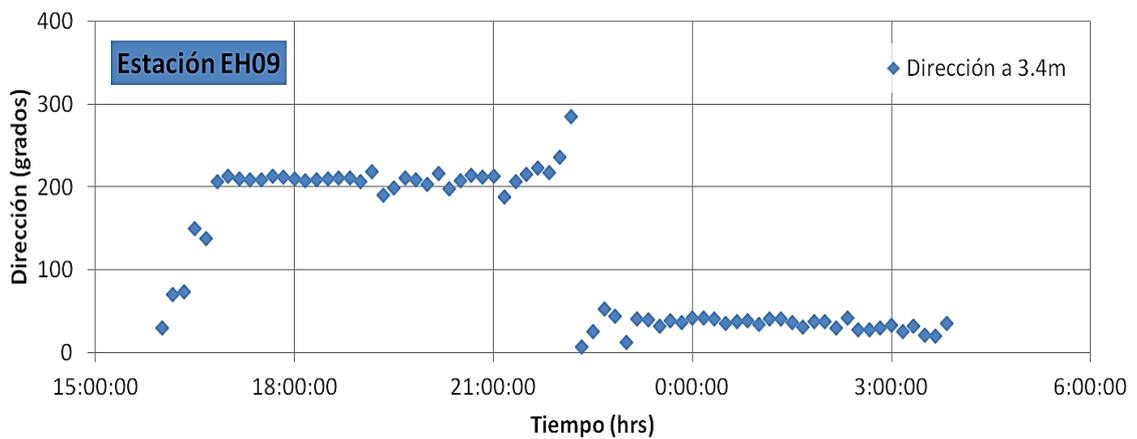
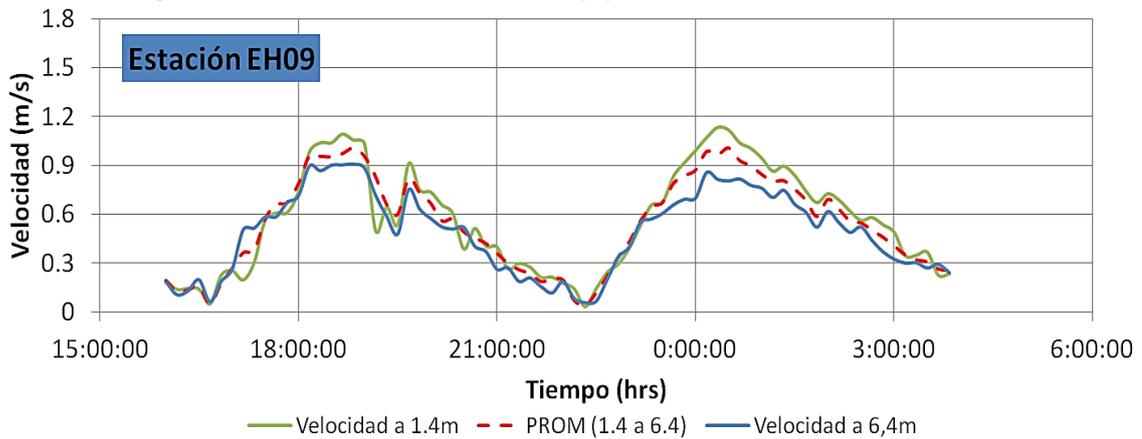
Nivel de mareas: Enfilada C2



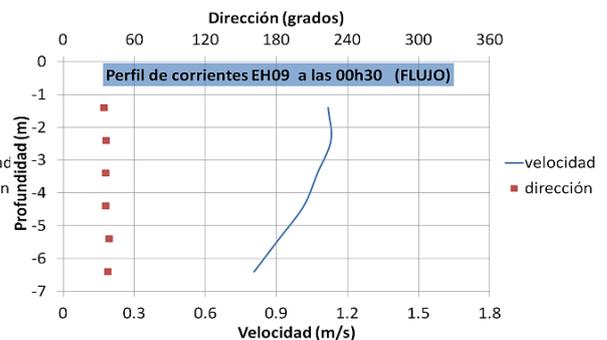
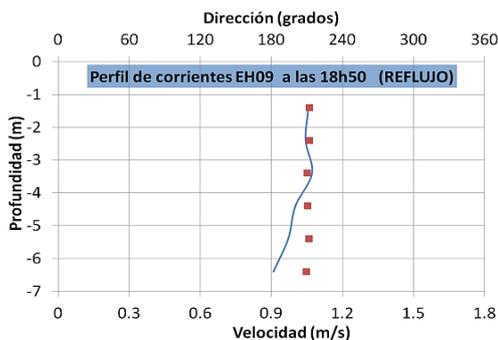
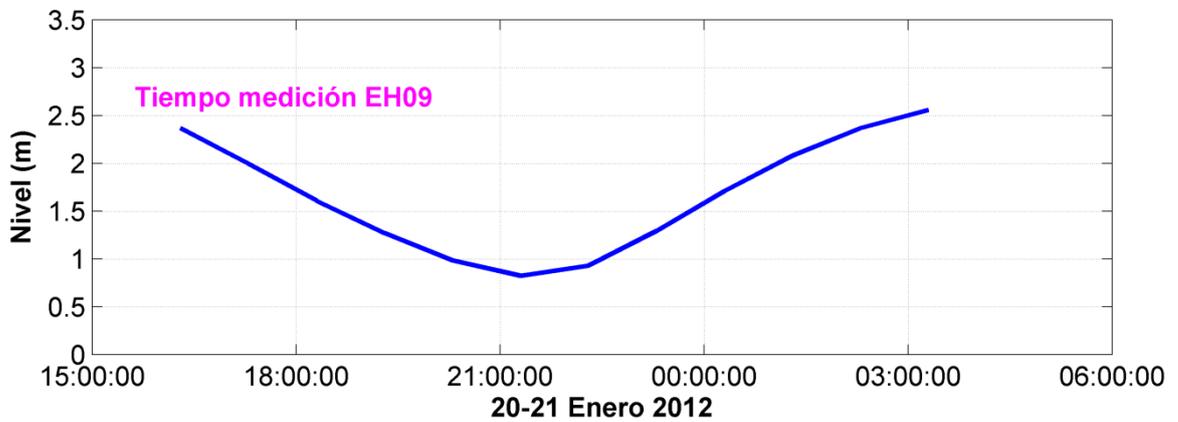
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-29

Figura 21. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS09.



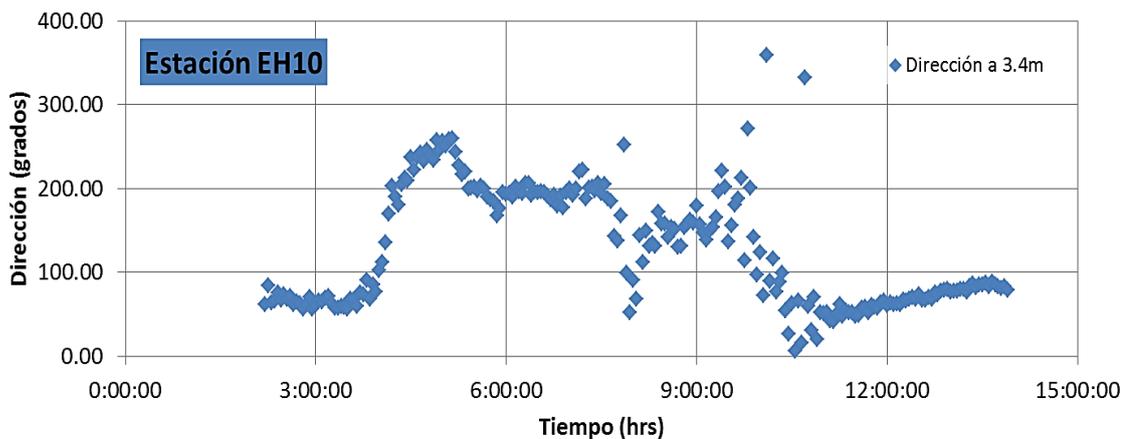
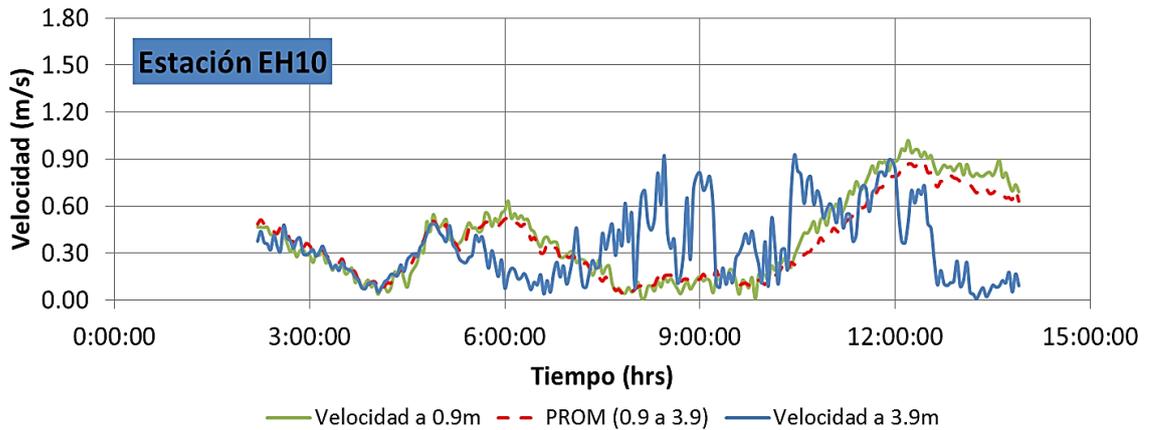
Nivel de mareas: Enfilada C2



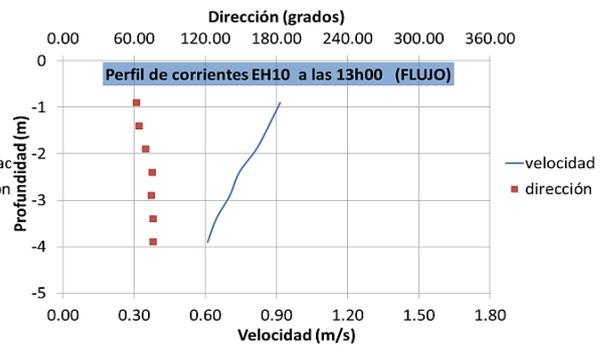
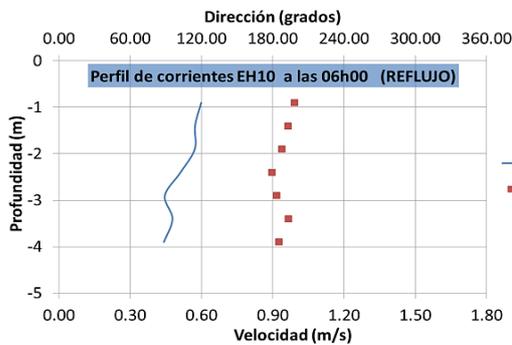
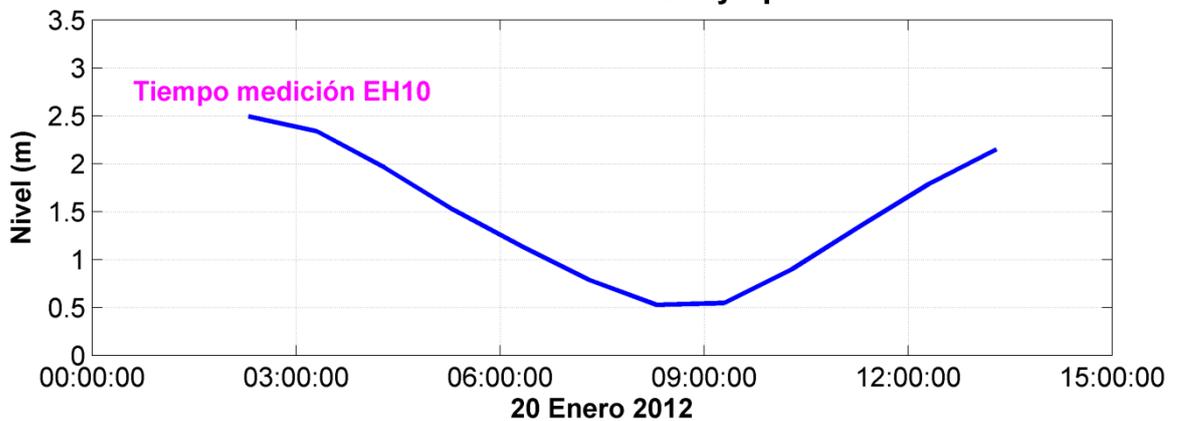
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-30

Figura 22. Medición de la corriente con el equipo ADCP en la estación EHS10.



**Nivel de mareas: Guayaquil**

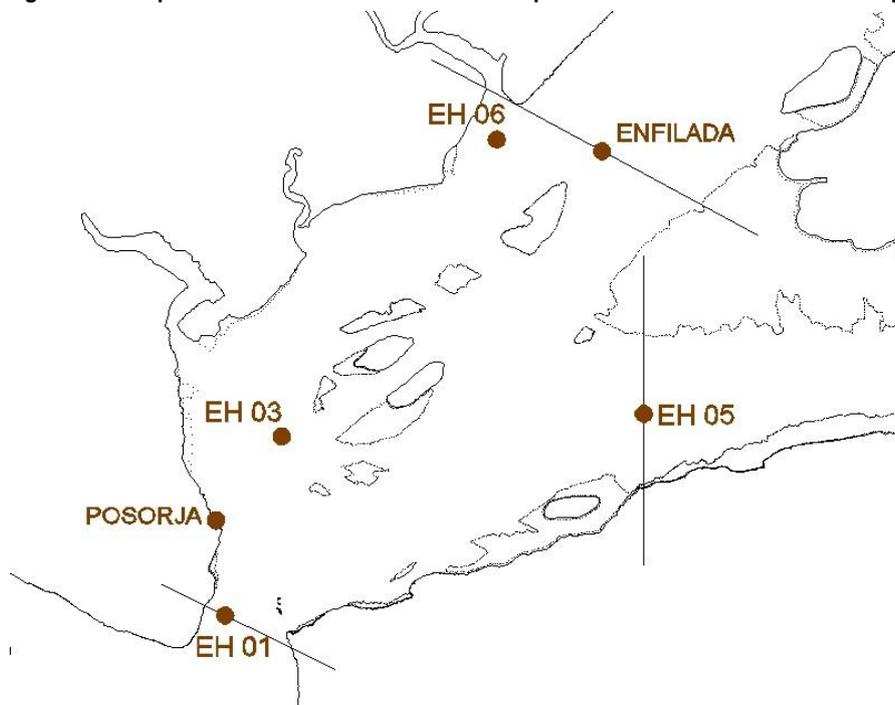


Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-31

Utilizando las mediciones de velocidad en las estaciones EHS03 y EHS06, y la pendiente hidráulica entre el puerto de Posorja y la Enfilada C2 (ver croquis del volumen de control en la Figura 23), es posible estimar el orden de magnitud del coeficiente de Chezy para el cálculo de las pérdidas de energía, ver Tabla 2.

Figura 23. Croquis del volumen de control utilizado para estimar el coeficiente de Chezy.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Tabla 2. Cálculo del coeficiente de Chezy basándose en las mediciones de nivel y velocidad en las estaciones EHS03 y EHS06. V es la velocidad,  $R_h$  el radio hidráulico,  $S_h$  la pendiente hidráulica y C el coeficiente de Chezy.

	V (m/s)	$R_h$ (m)	$S_h$ (E-06)	C ( $m^{1/2}/s$ )
<b>EHS03</b>				
1/24/2012 9:00	1,04	15	-26,1	53
<b>EHS06</b>				
1/22/2012 13:00	0,60	8	25,3	42
1/22/2012 20:00	1,00	9	-23,5	69

Fuente: Grupo de Trabajo 2012

De donde se deduce que el coeficiente de Chezy para el cálculo de las pérdidas de energía en el modelo debe estar entre 40 y 70  $m^{1/2}/s$ .

#### 16.4.1. Temperatura y salinidad

La temperatura medida a lo largo del Estero Salado durante la época húmeda tiene poca variación. La diferencia máxima registrada entre todas las estaciones es de 1,5 °C. La temperatura máxima registrada se localiza en la estación EHS10 (26,58 °C), mientras que la mínima se midió en la estación EHS01 (25,02 °C)

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-32

La salinidad medida a lo largo del Estero Salado durante la época húmeda presenta un poca más de variación. La salinidad en la superficie de la parte interna del estero (EHS06, EHS07, EHS08, EHS09 y EHS10) alcanza valores mayores a los 24 PSU (el máximo se registró en la EHS09 con un valor de 28,35 PSU); a la entrada del estero (EHS01, EHS02 y EHS03) la salinidad más alta es de 21,77 PSU (EHS03). La salinidad más baja se midió dentro del Canal Cascajal (19,4 PSU en la estación EHS05).

La salinidad en el fondo es ligeramente superior a la de superficie.

#### 16.4.2. Concentración de sólidos en suspensión

De los resultados de la campaña de muestreo realizada en época cálida-húmeda el día 21 de Enero de 2012, se deduce que la concentración de sólidos en suspensión dentro del Estero Saldo cerca del fondo es mayor que en la superficie. Cerca del fondo la concentración de sólidos en suspensión oscila entre 0,355 y 1,195 kg/m<sup>3</sup>, mientras que cerca de la superficie la concentración de sólidos en suspensión oscila entre 0,153 y 0,183 kg/m<sup>3</sup>.

#### 16.4.3. Tasa de azolvamiento

Utilizando la información de las batimetrías de post dragado y batimetrías de comprobación realizadas por la Fiscalización del Dragado de Mantenimiento entre Marzo 2009 y Febrero 2011 se calculan diferentes tasas de azolvamiento a lo largo del canal de navegación. Según esta información el azolvamiento disminuye entre más adentro del canal de navegación se encuentre (boyas 54 a 62). El tramo con mayor tasa de azolvamiento es el comprendido entre las boyas 45 a 48 con 157.943 m<sup>3</sup>/mes (ente Febrero y Abril 2011); mientras que el tramo con menor tasa de azolvamiento es el comprendido entre las boyas 54 a 62 con 4.043 m<sup>3</sup>/mes (entre Julio 2009 y Marzo 2011).

Tabla 3. Cálculo de la Tasa de Azolvamiento

TRAMO	TRAMO ANALIZADO (BOYAS)	LONGITUD ANALIZADA (Km)	TIEMPO TRANSC. (meses)	VOLUMEN SEDIMENTOS (m <sup>3</sup> )	TASA DE SEDIMENTOS MENSUAL (m <sup>3</sup> /mes)
V	37 a 45	5.8	8	524 487	65 561
IOA 1071	44 a 45				145 294*
	45 a 48				157 943*
	44 a 51	8.15	8	523 218	65 402
	54 a 62	8.55	20	80 861	4 043
				*Promedio de varios dragados	

Elaborado por: Grupo de trabajo

## 16.5. Simulaciones de Prueba

Dado que las condiciones iniciales no son correctas, es necesario correr el modelo bajo condiciones controladas, para determinar el tiempo que se requiere para que el error en la condición inicial desaparezca (periodo de calentamiento).

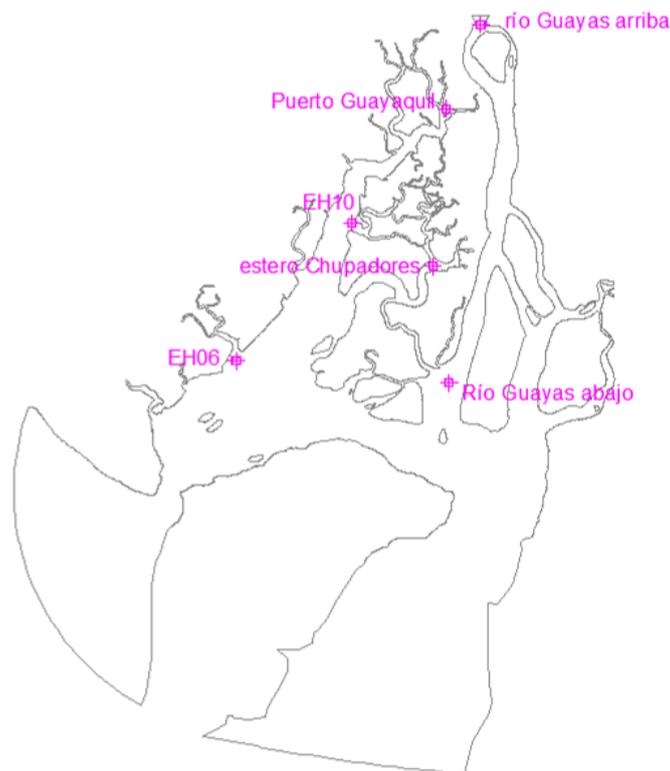
A fin de estimar el tiempo de calentamiento necesario se usa una condición de frontera periódica. De esta manera, se supone que el error en la condición inicial desaparece cuando la respuesta del modelo es periódica.

Para esta simulación se corre el modelo 42 días con las siguientes condiciones de frontera. En el mar se usa una marea senoidal, con amplitud de 2m y periodo de 12 horas, temperatura de 20 °C, salinidad de 33 PSU y concentración de sólidos en suspensión de 0 kg/m<sup>3</sup>. En el Río Guayas se usa un gasto constante de 1 500 m<sup>3</sup>/s, temperatura de 10 °C, salinidad 0 PSU y concentración de sólidos en suspensión de 1,8 kg/m<sup>3</sup>.

Como condición inicial se usan los siguientes valores: nivel de 2,5 m, temperatura de 20 °C, salinidad de 33 PSU y concentración de sólidos en suspensión de 0,5 kg/m<sup>3</sup>.

Para el monitoreo de la periodicidad de la solución se utilizan las siguientes estaciones: por el Estero Salado se utilizan la EHS06, EH10 y Puerto Guayaquil, un punto en el Estero Chupadores Grande y por el lado del Río Guayas se utilizan dos estaciones que se muestran en la figura siguiente.

Figura 24. Localización de puntos para el monitoreo de la solución.

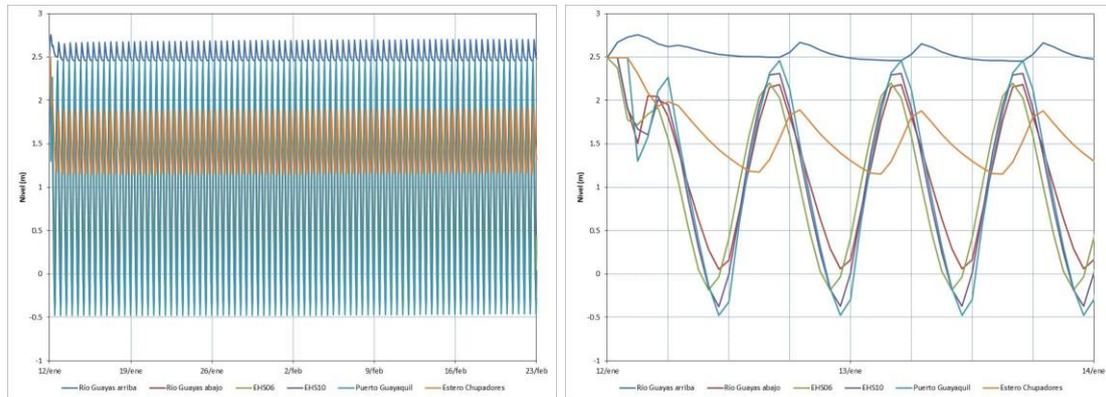


Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-34

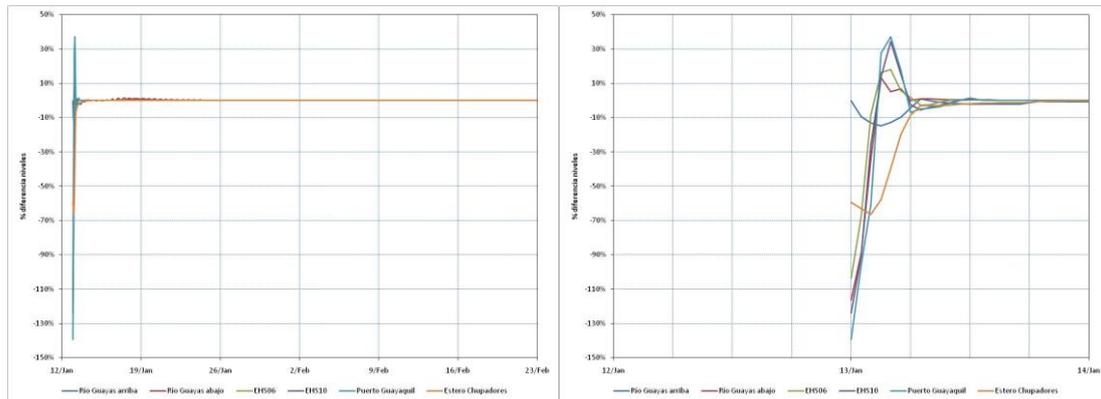
En la Figura 25 se muestran los niveles calculados en los puntos de monitoreo. Obsérvese en la Figura 26 que la diferencia de niveles calculados entre dos días consecutivos cae rápidamente por debajo del 10% de la amplitud de la marea, en menos de 12 horas.

**Figura 25. Niveles calculados en varios puntos del modelo. A la izquierda se muestran los 42 días de la simulación, mientras que a la derecha se muestran sólo los dos primeros días.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

**Figura 26. Diferencia de niveles calculados entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. A la izquierda se muestran los 42 días de la simulación, mientras que a la derecha se muestran sólo los dos primeros días.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En la Figura 27 se muestra la velocidad calculada en los puntos de monitoreo. Obsérvese en la Figura 28 que la diferencia de velocidades calculadas entre dos días consecutivos cae rápidamente por debajo del 10% de una velocidad de referencia (1 m/s), en menos de 12 horas.

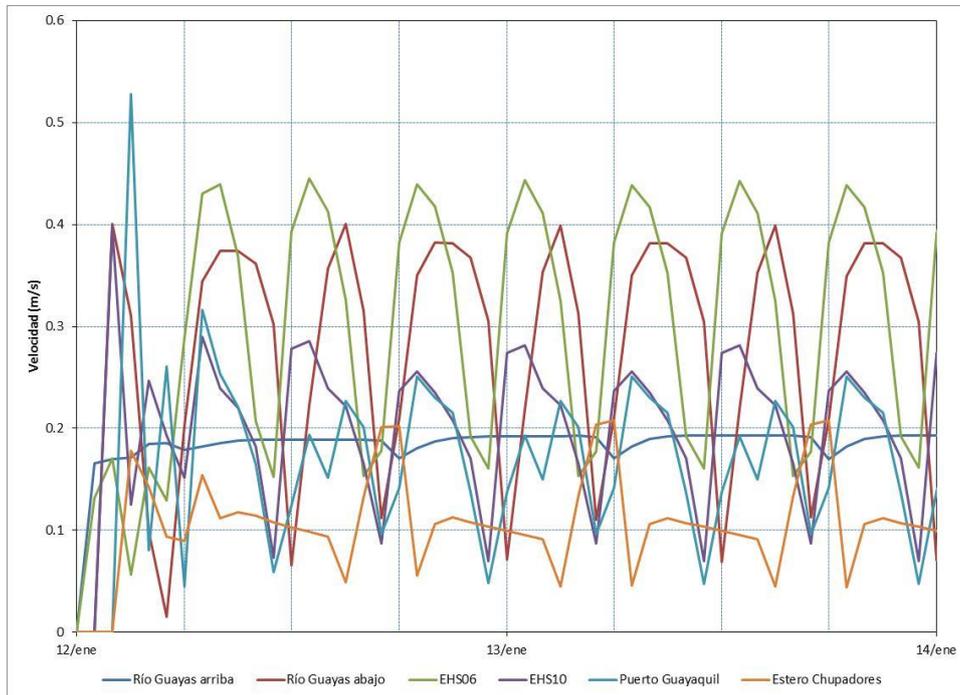
En la Figura 29 se muestra la temperatura calculada en los puntos de monitoreo. Obsérvese que la temperatura en la estación Río Guayas Arriba cae rápidamente por efecto de la descarga del Río Guayas. No obstante, en la estación Río Guayas Abajo la temperatura está influenciada tanto por el agua de mar como por el agua del Río Guayas, por lo que tarda más de 14 días para adquirir el valor que impone la descarga del Río. Algo similar sucede en la estación Estero Chupadores Grande, donde hacia el final de los 42 días de simulación, la temperatura del agua empieza a disminuir por efecto del agua que pasa del Río Guayas a este estero.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-35

De lo anterior, se concluye que el error cometido por no conocer las condiciones iniciales de temperatura se extiende por un largo tiempo. Lo anterior se debe a que los cambios en la temperatura son el resultado de la transferencia de masa, lo cual es un proceso más lento que la transferencia de energía. Por otro lado, se observa también que la diferencia de valores entre dos días consecutivos no es un indicador preciso para determinar la periodicidad de la solución, ver Figura 30.

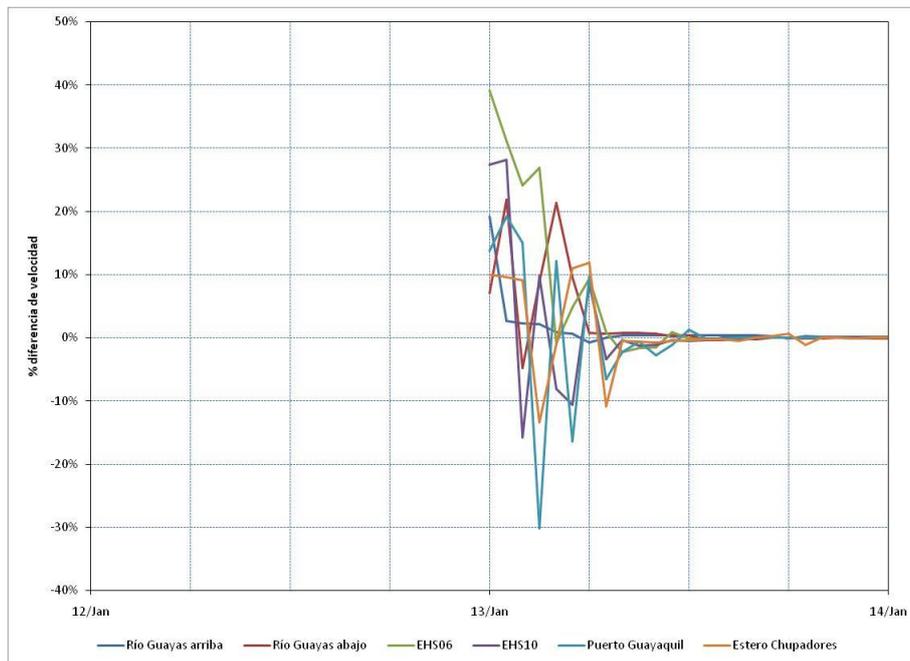
La salinidad tiene un comportamiento similar al de la temperatura, ver Figura 31 y Figura 32. Por lo que se concluye también que el error cometido por no conocer las condiciones iniciales de salinidad se extiende por un largo tiempo debido a que el proceso de transporte de masa es lento.

**Figura 27. Velocidades calculadas en varios puntos del modelo. Se muestran sólo los dos primeros días.**



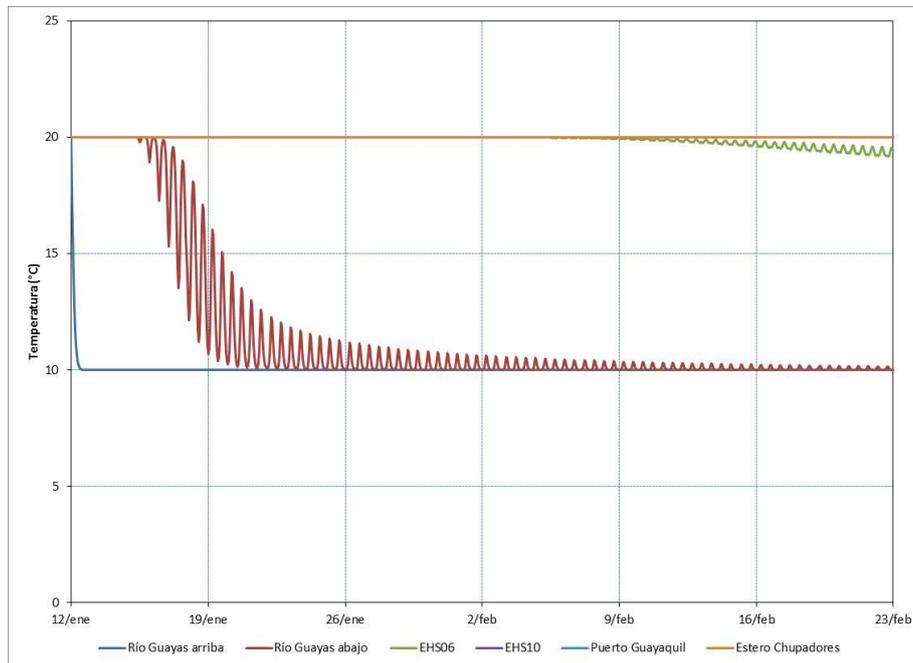
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

**Figura 28. Diferencia de velocidades calculadas entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. Se muestran sólo los dos primeros días.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

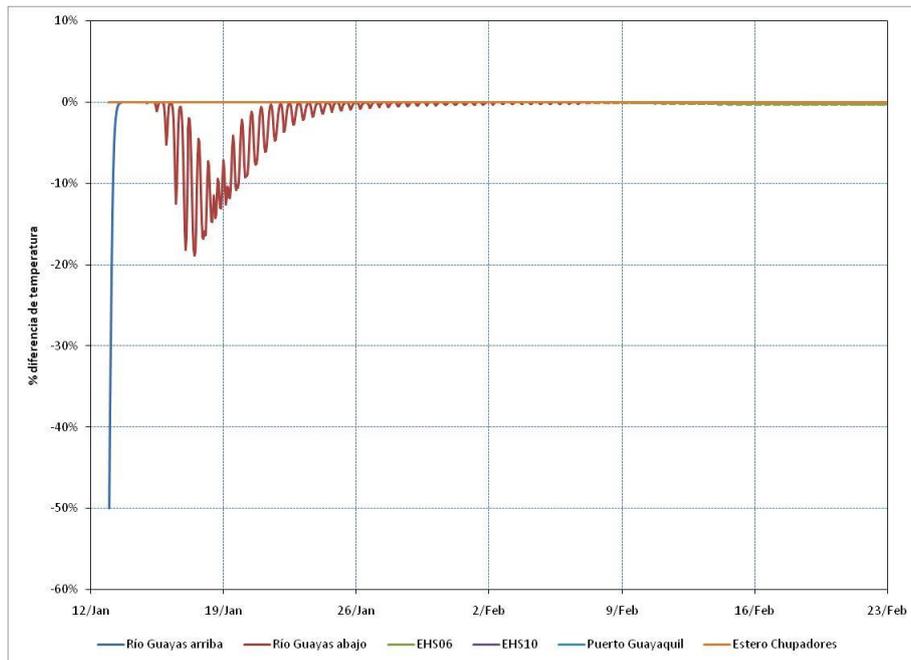
**Figura 29. Temperaturas calculadas en varios puntos del modelo.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

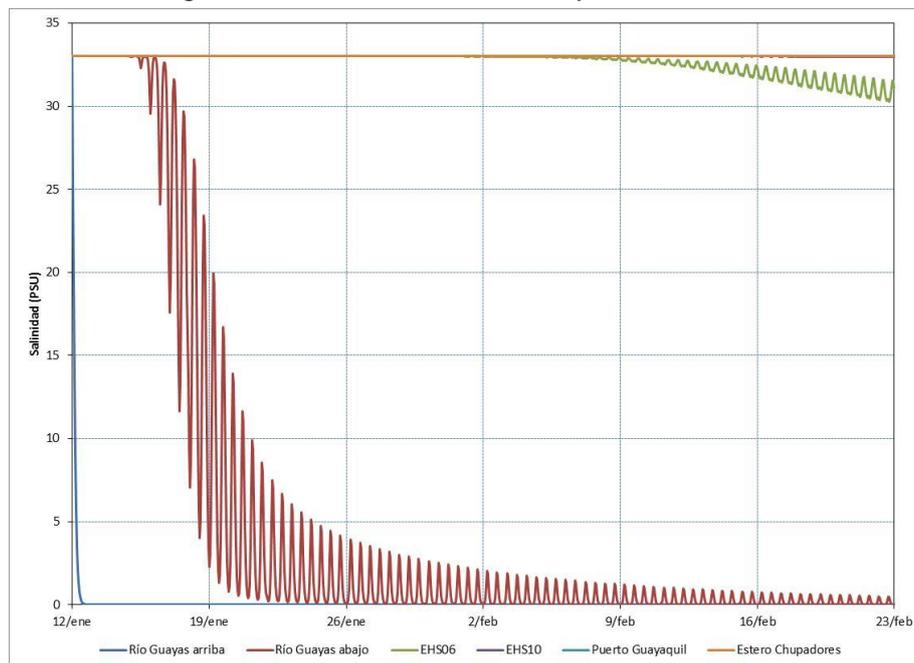
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-37

**Figura 30. Diferencia de temperaturas calculadas entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo.**



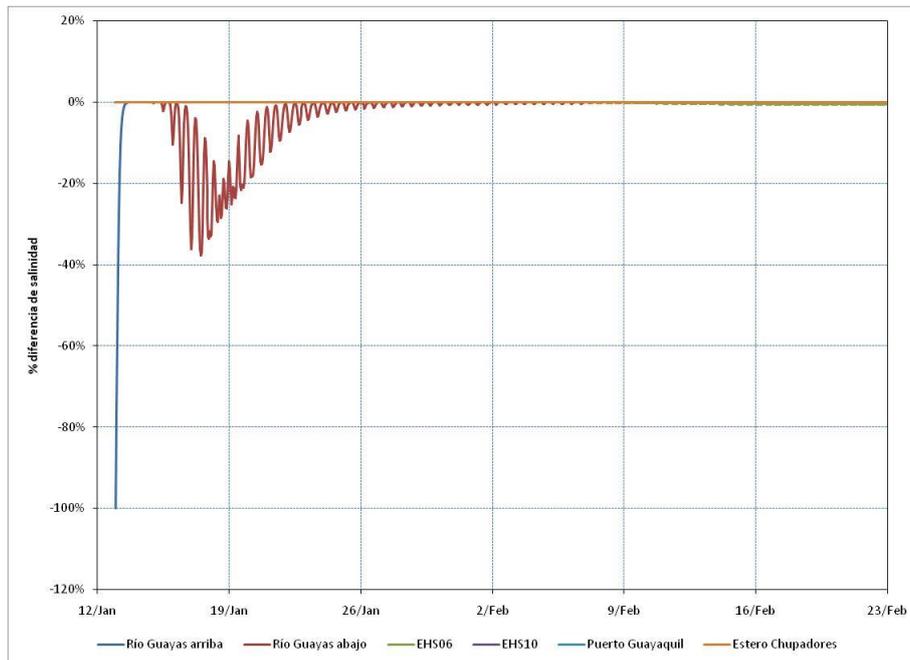
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

**Figura 31. Salinidad calculada en varios puntos del modelo.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

**Figura 32. Diferencia de salinidad calculada entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En la Figura 33 se muestra la concentración de sólidos en suspensión calculada en los puntos de monitoreo. Obsérvese que las mayores oscilaciones en la concentración de sólidos en suspensión se presenta en las estaciones EHS06 (casi  $1 \text{ kg/m}^3$ ) y Río Guayas Abajo ( $0,4 \text{ kg/m}^3$ ), mientras que en las estaciones Río Guayas Arriba, Estero Chupadores Grande y EHS10 las oscilaciones en la concentración son menores a los  $0,1 \text{ kg/m}^3$ .

En la Figura 34 se muestra la diferencia de la concentración de sólidos en suspensión entre dos días seguidos. Obsérvese que rápidamente el modelo alcanza resultados periódicos (diferencias de concentración entre dos días consecutivos menores a 10% de la concentración de referencia,  $0,5 \text{ kg/m}^3$ ): en todas las estaciones se requiere menos de un día, menos en la EHS10 donde se requieren poco menos de dos días.

En la Figura 35 se muestra el esfuerzo cortante en la capa de fondo calculado en los puntos de monitoreo. Obsérvese que las mayores oscilaciones en el esfuerzo cortante en la capa de fondo se presenta en las estaciones EHS06 (casi  $0,3 \text{ N/m}^2$ ) y Río Guayas Abajo ( $0,2 \text{ N/m}^2$ ).

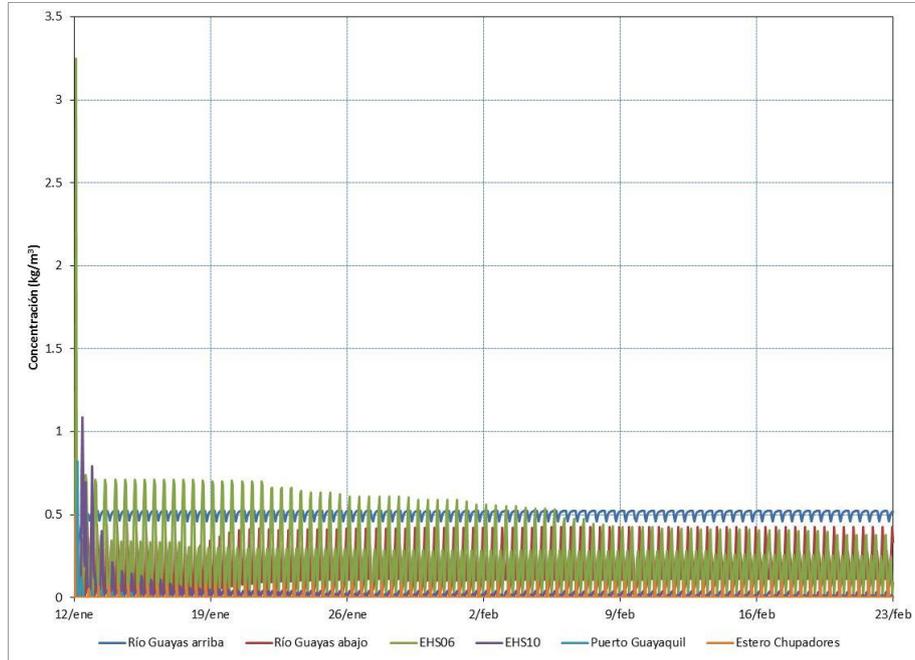
En la Figura 36 se muestra la diferencia en el esfuerzo cortante en la capa de fondo entre dos días seguidos. Obsérvese que rápidamente el modelo alcanza resultados periódicos (diferencias de esfuerzo entre dos días consecutivos menores a 10% del esfuerzo de referencia,  $0,1 \text{ N/m}^2$ ): en todas las estaciones se requiere menos de un día, menos en la EHS10 donde se requieren poco menos de dos días.

De todo lo anterior se deduce que para el modelo hidrodinámico basta un periodo de marea para disipar los errores cometidos en las condiciones iniciales; para el modelo de transporte de sedimentos dentro del Estero Salado se requieren del orden de 3 periodos de marea; y para el modelo de advección, el cual tiene que ver con el

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-39

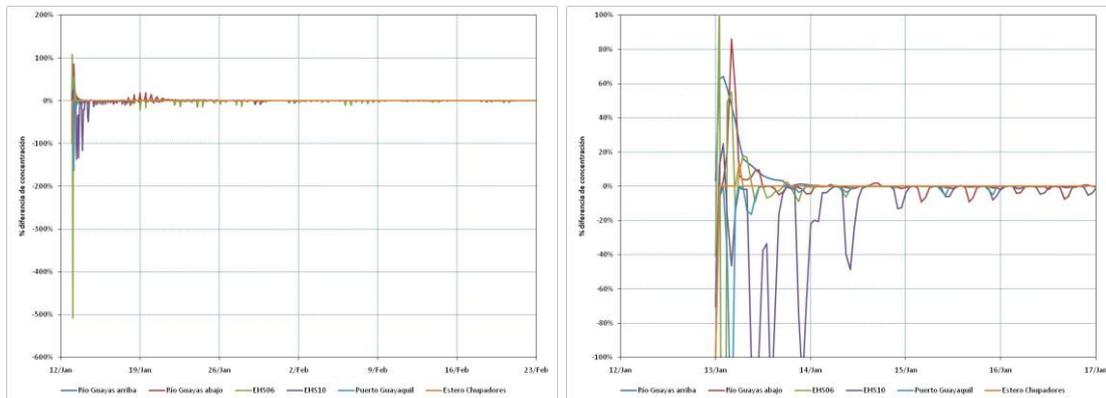
transporte de masa, 42 días no son suficientes para disipar el error en la condición inicial.

Figura 33. Concentración de sólidos en suspensión calculada en varios puntos del modelo.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

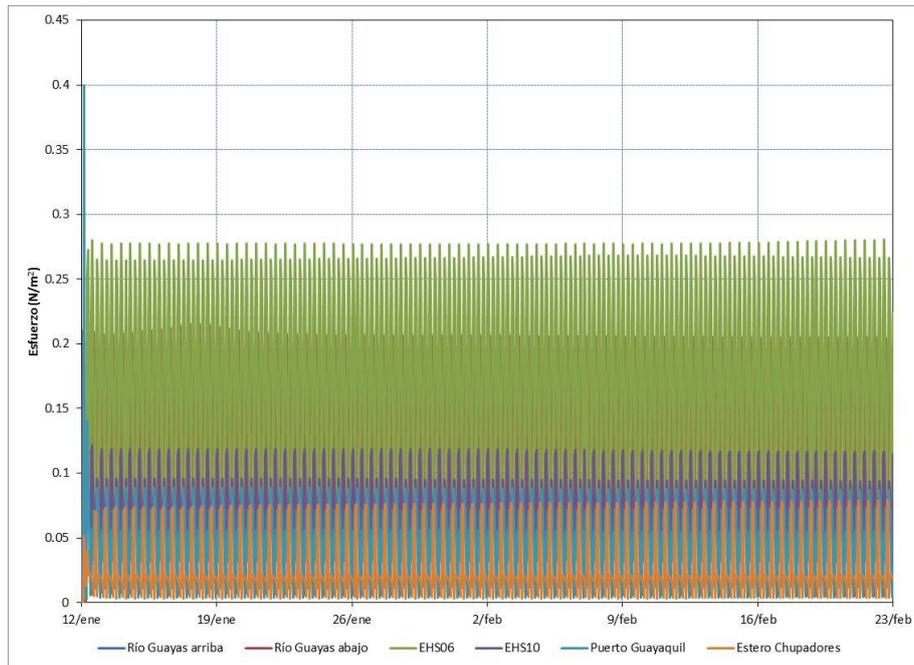
Figura 34. Diferencia de concentración de sólidos en suspensión calculada entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. A la izquierda se muestran los 42 días de la simulación, mientras que a la derecha se muestran sólo cinco días.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

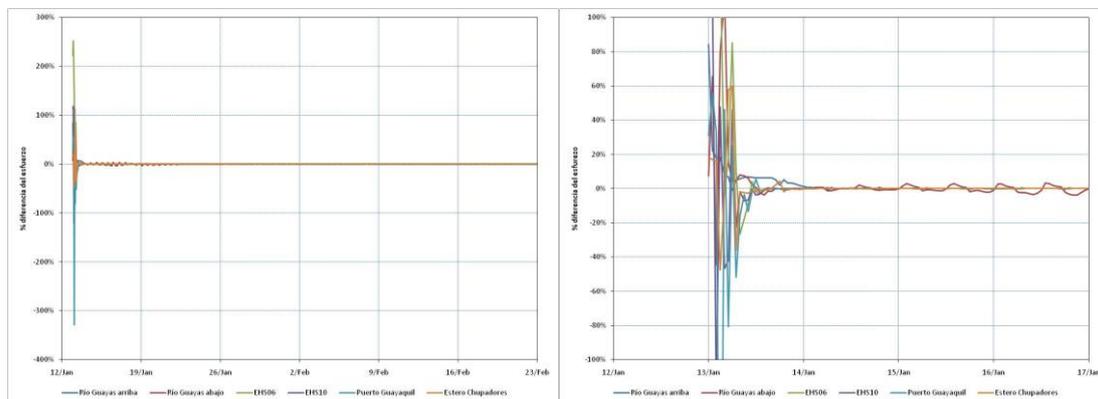
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-40

Figura 35. Esfuerzo cortante en el fondo calculado en varios puntos del modelo.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Figura 36. Diferencia de Esfuerzo cortante en el fondo calculado entre dos días consecutivos en varios puntos del modelo. A la izquierda se muestran los 42 días de la simulación, mientras que a la derecha se muestran sólo cinco días.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

## 16.6. Calibración del Modelo

Para la calibración del modelo hidrodinámico (HD) y de transporte de sedimentos (MT) se ajustan principalmente los parámetros referentes a las pérdidas de energía y los referentes a la caída de los sedimentos y la erosión del fondo.

Para determinar el ajuste del modelo se comparan los cálculos con las mediciones de nivel, velocidad, concentración de sólidos en suspensión y azolvamiento del sistema.

Para el modelo hidrodinámico se utilizaron los siguientes parámetros:

- Paso de tiempo para integrar las ecuaciones de 3 s.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-41

- El dominio temporal se mantuvo del 18 al 26 de Enero de 2012.
- Se utilizan celdas que entran y salen del cálculo dependiendo del tirante de agua en ellas. Se supone que cuando las celdas tienen un tirante menor a 0,005 m se secan y salen del cálculo. Cuando las celdas tienen un tirante mayor a 0,10 m se supone que se mojan y se incorporan nuevamente en el cálculo.
- Se supone que la densidad es constante.
- Como modelo de turbulencia (viscosidad de remolino) se utiliza la fórmula de Smagorinsky con un coeficiente de 0,28.
- Para las pérdidas de energía se usa la fórmula de Chezy. Se probaron varios coeficientes, encontrándose que el mejor ajuste se obtiene con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ , el cual se encuentra dentro del rango estimado a partir de las mediciones (ver Tabla 2).
- Se tomó en cuenta la fuerza que genera la aceleración de Coriolis.
- No se tomó en cuenta ningún tipo de fuerza externa como el viento y el oleaje.

Por el lado del modelo de transporte de sedimentos se utilizaron las siguientes consideraciones:

- Que el sedimento está representado por una sola fracción.
- Se supone que el sedimento es principalmente limoso con un diámetro de 0,05 mm y densidad de las partículas de  $2650 \text{ kg/m}^3$ . Por lo que, según las fórmulas de Rubey y Stokes la velocidad de caída es del orden de 0,002 m/s.
- Se supone que la velocidad de caída es constante y que el sedimento no flocula.
- Según las fórmulas de Engelund & Fredsoe el esfuerzo crítico de depósito para este tipo de partículas es de  $0,005 \text{ N/m}^2$ . Este parámetro es sujeto a calibración. En el modelo se supuso igual a  $0,1 \text{ N/m}^2$ .
- Para la erosión del fondo se supuso que los sedimentos no están consolidados y que el fondo es "suave". Según la teoría de Shields el esfuerzo máximo que resisten este tipo de partículas antes de moverse es de  $0,158 \text{ N/m}^2$ . Según la fórmula de Parchure & Melhta, la tasa de erosión puede estimarse con una función exponencial con coeficiente  $E_0$ , y exponente  $\alpha = 8,3$ . Estos parámetros son sujetos a calibración. Se probaron varios valores de  $E_0$ , resultando que el mejor ajuste se obtiene con  $E_0 = 0,1 \text{ e-5}$ .

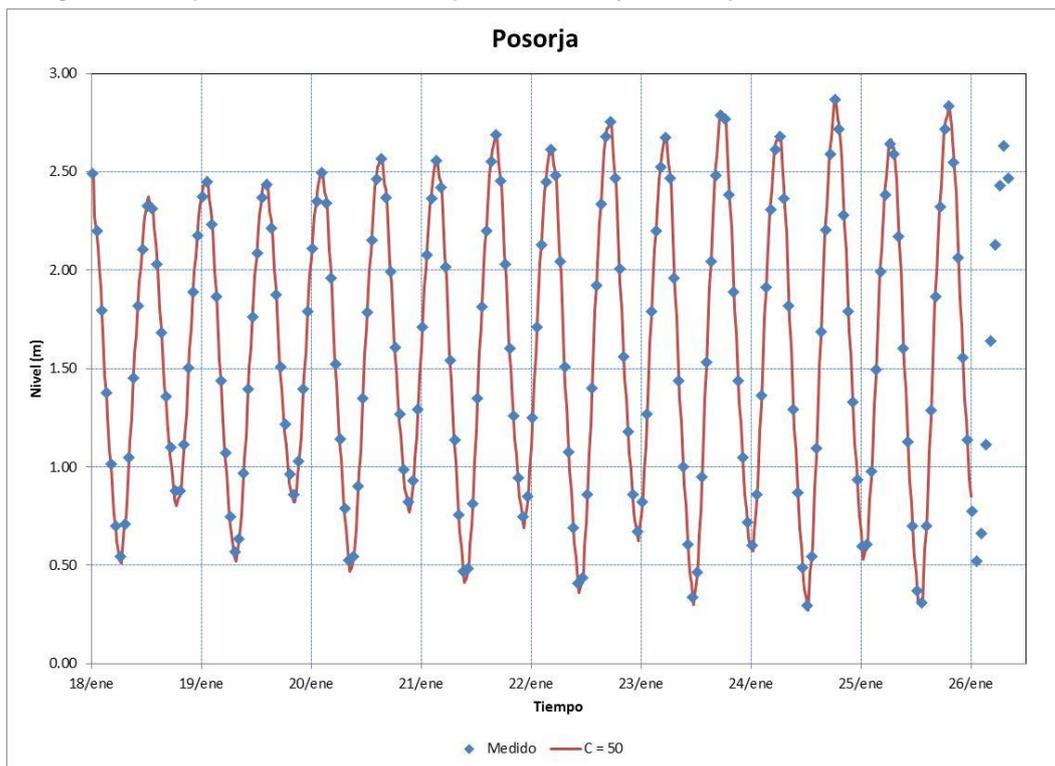
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-42

- Se supuso que la densidad del material en el fondo es de  $1\,200\text{ kg/m}^3$ , y una rugosidad de  $0,001\text{ m}$ .
- Se supuso que el coeficiente de dispersión horizontal es igual al calculado en el modelo hidrodinámico.
- Se supone que a lo largo de todo el modelo existe una capa de sedimentos de  $1\text{ metro}$  de espesor.
- Se supone que las variaciones en el espesor de esta capa no alteran la hidrodinámica del sistema.

### 16.6.1. Comparación de niveles

En las siguientes figuras se comparan los resultados del modelo con las mediciones de nivel en Posorja, Enfilada C2 y Puerto de Guayaquil.

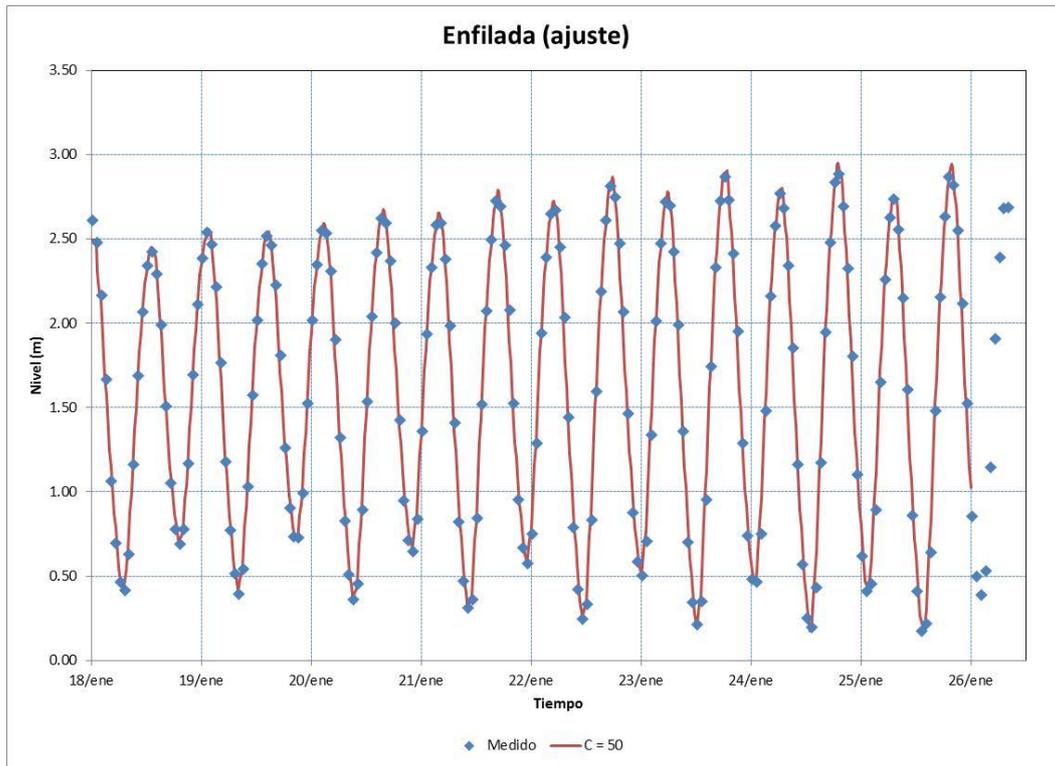
Figura 37. Comparación de niveles en el puerto de Posorja. Medido y calculado con  $C = 50\text{ m}^2/\text{s}$ .



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

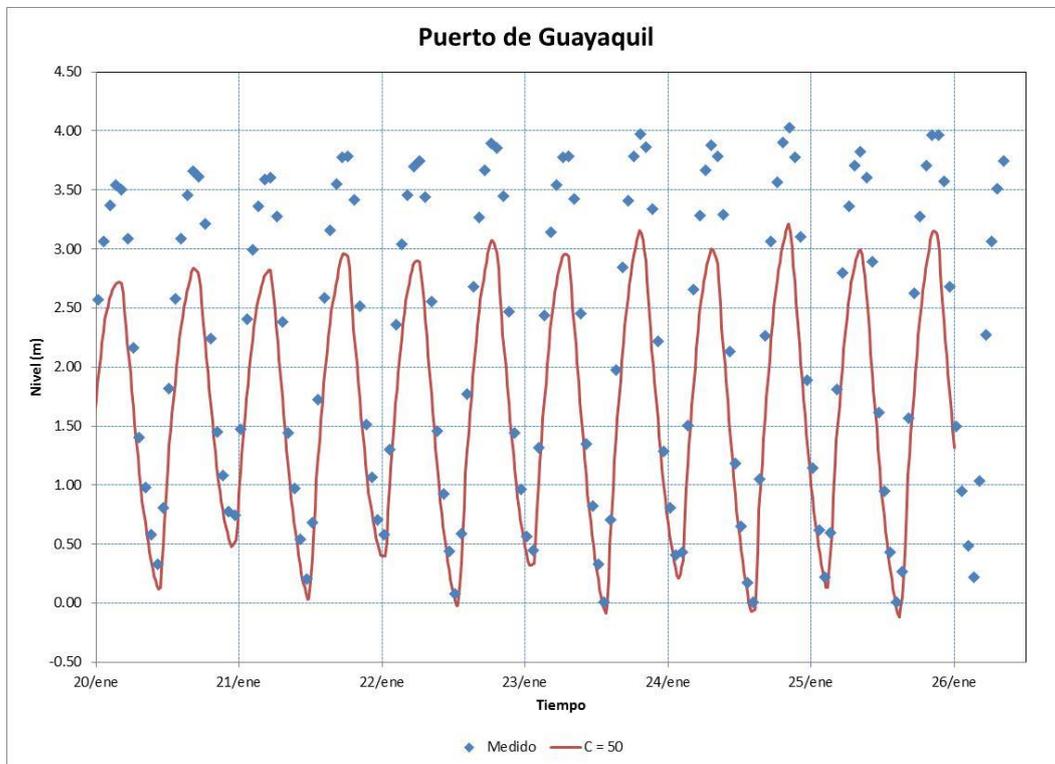
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de $11\text{m}$ . respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-43

Figura 38. Comparación de niveles en la Enfilada C2. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ .



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Figura 39. Comparación de niveles en el Puerto de Guayaquil. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ .



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-44

**Tabla 4. Diferencia entre la amplitud medida en las estaciones mareográficas Posorja, Enfilada y Puerto y la amplitud calculada con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ .**

Amplitud	Posorja (m)	Enfilada C2 (m)	Guayaquil (m)
Medida	2,57	2,71	4,02
C=50	2.57	2.73	3.30
<b>Diferencia</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.02</b>	<b>0.72</b>

Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Nótese que los cálculos con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  se ajustan muy bien a las mediciones tanto en Posorja como en la Enfilada C2, donde se sobrestima la amplitud de la marea en sólo 0,02 m. El ajuste del modelo no es tan bueno en el Puerto de Guayaquil, donde el modelo subestima la amplitud de la marea hasta en 0,72 m.

Sin embargo es importante indicar que la diferencia de niveles en el puerto de Guayaquil no es sólo responsabilidad del coeficiente de fricción. Entre los aspectos más importantes que influyen en este ajuste se encuentran: batimetría, tanto del Estero Salado (no sólo el canal de navegación sino todo el estero) como de los canales del Golfo; presencia de manglar (ya que disminuye el área hidráulica efectiva) y la hidrología de los esteros que comunican con el Estero Salado.

En la siguiente tabla se asienta el cálculo de la media cuadrática (RMS) de las diferencias entre los niveles medidos y calculados con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  en las estaciones mareográficas Posorja, Enfilada C2 y Puerto de Guayaquil. Estas diferencias constituyen el error medio cuadrático del modelo y sirven para medir el grado de ajuste del modelo. Obsérvese que en Posorja y Enfilada C2 el error medio cuadrático del modelo es menor al 3%, mientras que en el puerto de Guayaquil el error medio cuadrático del modelo es de 16%. El promedio de esta medida en las tres estaciones es del 7%.

**Tabla 5. Cálculo de la media cuadrática (RMS) de las diferencias entre los niveles medidos y calculados ( $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ) en las estaciones mareográficas Posorja, Enfilada y Puerto.**

	Amplitud max (m)	RMS (m)	RMS (%)
<b>Posorja</b>	2.57	0.03	<b>1%</b>
<b>Enfilada C2</b>	2.71	0.09	<b>3%</b>
<b>Guayaquil</b>	4.02	0.65	<b>16%</b>

Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Por lo anterior, puede decirse que el modelo reproduce los niveles en la parte sur del modelo, entre el Golfo de Guayaquil y la Enfilada C2, con un error menor al 3%.

### 16.6.2. Comparación de velocidades

En las siguientes figuras se comparan los resultados del modelo con las mediciones de velocidad registradas por el ADCP en las estaciones EHS01, EHS03, EHS05, EHS06, EHS08 y EHS10. Se utiliza la velocidad promedio en la vertical y la dirección del flujo a media profundidad, en la mayoría de los casos a 3,4 m.



Obsérvese que en la EHS01 (Figura 40), una de las dos entradas de agua de mar al sistema, se estima correctamente la intensidad y la dirección de la corriente, pero con un poco de defasamiento (1 hora aproximadamente).

En la estación EHS03 (Figura 41), a diferencia de la estación EHS01, los cálculos de la intensidad de corriente se subestiman durante el reflujos del orden de 0,60 m/s, pero la dirección de la corriente se reproduce bastante bien. Obsérvese que durante el flujo la intensidad de la corriente medida es un poco errática, respecto al cálculo, el cual no puede reproducir este comportamiento.

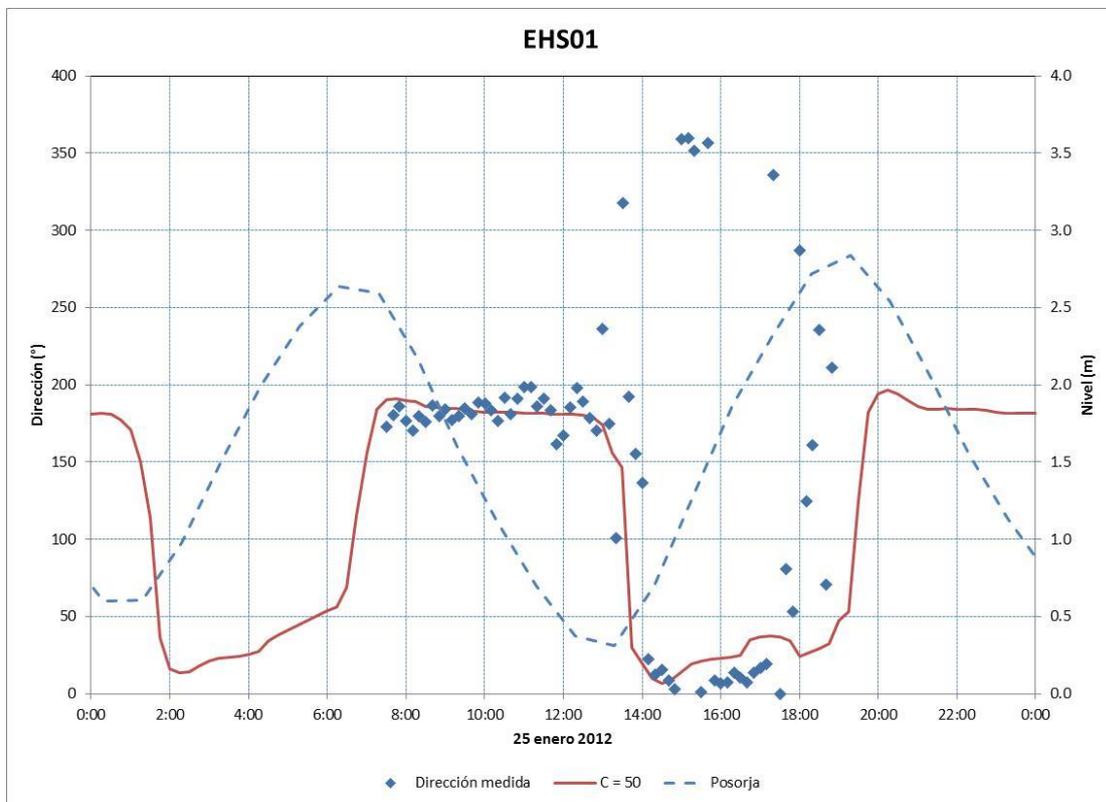
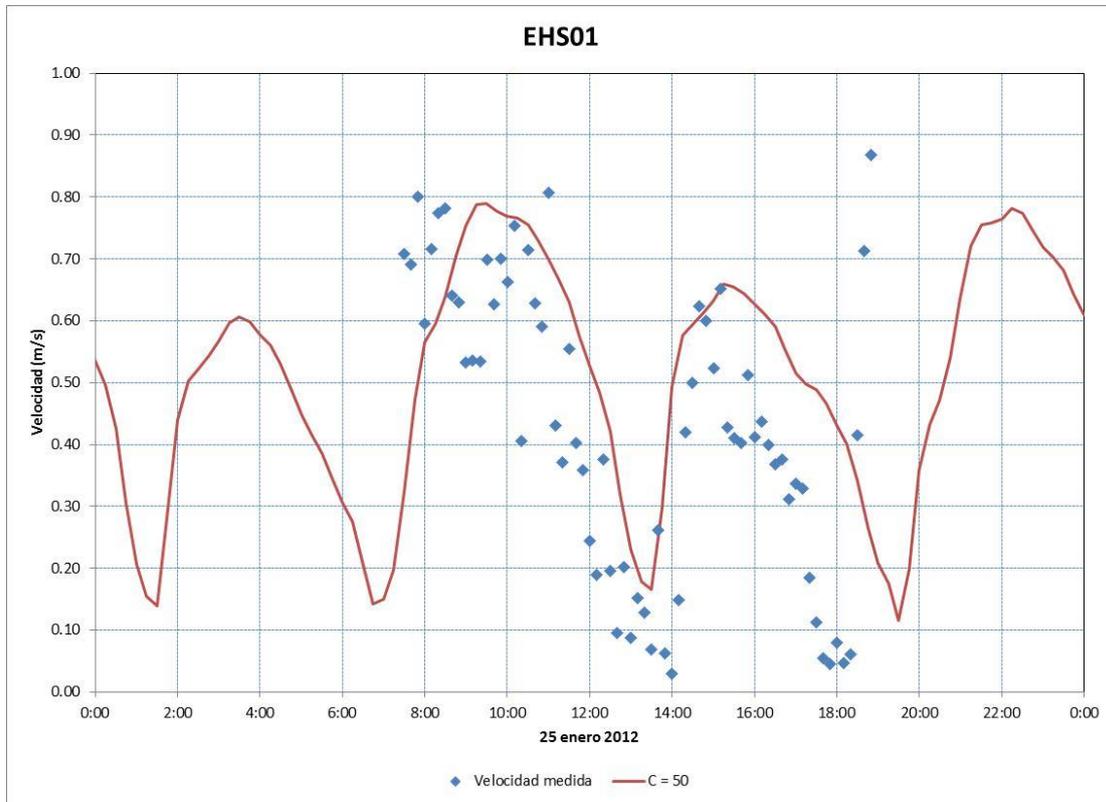
Obsérvese que en la estación EHS05 el cálculo de la intensidad de corriente vuelve estar por debajo de lo medido, pero la dirección de la misma se reproduce bastante bien, tanto durante el flujo como en el reflujos. Recuérdese que esta estación se encuentra dentro del Canal Cascajal, lo cual significa que el modelo reproduce bien la dirección del intercambio de agua entre el Estero Salado y el Río Guayas, pero se subestima el volumen de agua que se traslada de un lado al otro. Nótese que debido a la falta de información medida sobre el Río Guayas es imposible calibrar el modelo en esta parte.

Obsérvese que en la estación EHS06 el cálculo de la intensidad de corriente se subestima tanto durante el flujo como en el reflujos. Nótese que las mediciones son asimétricas durante el flujo y el reflujos, mientras que en el modelo no sucede así. Respecto a la dirección de la velocidad, el modelo reproduce bastante bien las mediciones.

Nótese que las estaciones EHS01, EHS05 y EHS06 delimitan un volumen de control compuesto por tres ramas: canal del Morro, canal Cascajal y Estero Salado; mientras que la estación EHS03 se encuentra al centro de este volumen de control. Nótese que deben incrementarse las velocidades en las dos estaciones que funcionan como salidas durante el flujo (EHS05 y EHS06) y mantenerse en la estación por la que entra el flujo (EHS01), la cual debiera ser la suma de las otras dos. Nótese que EHS03 confirma la necesidad de incrementar las velocidades en el sistema.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-46

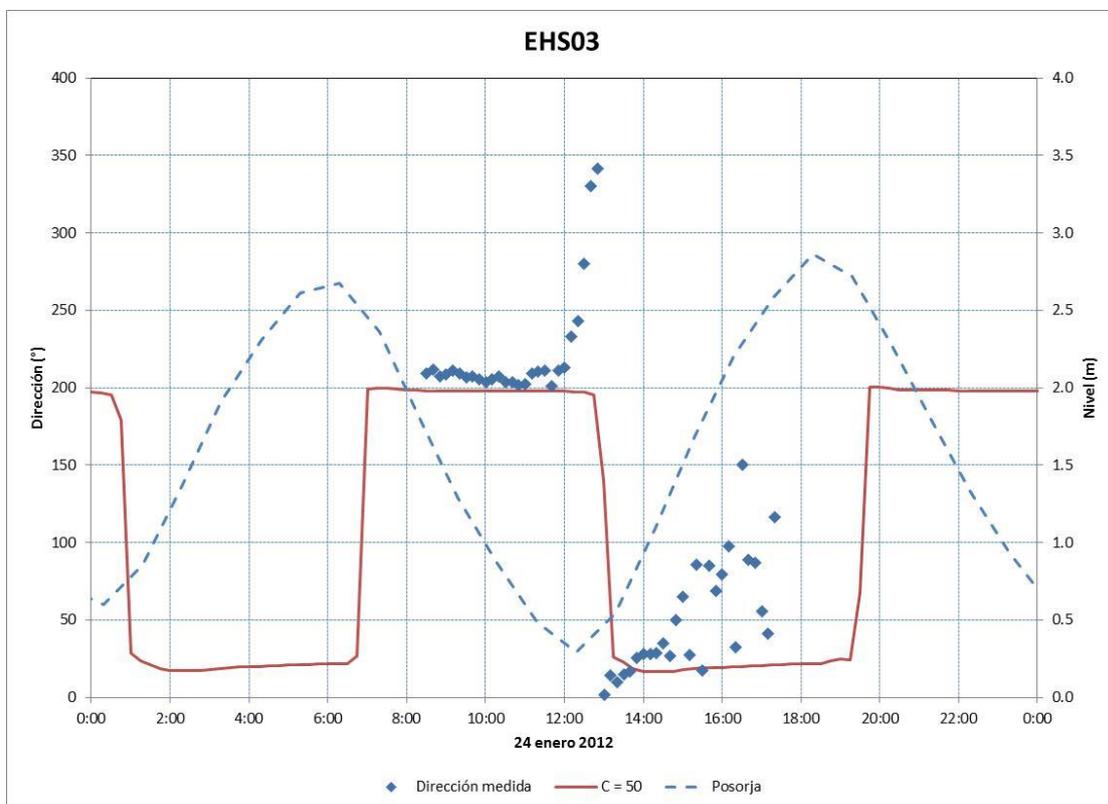
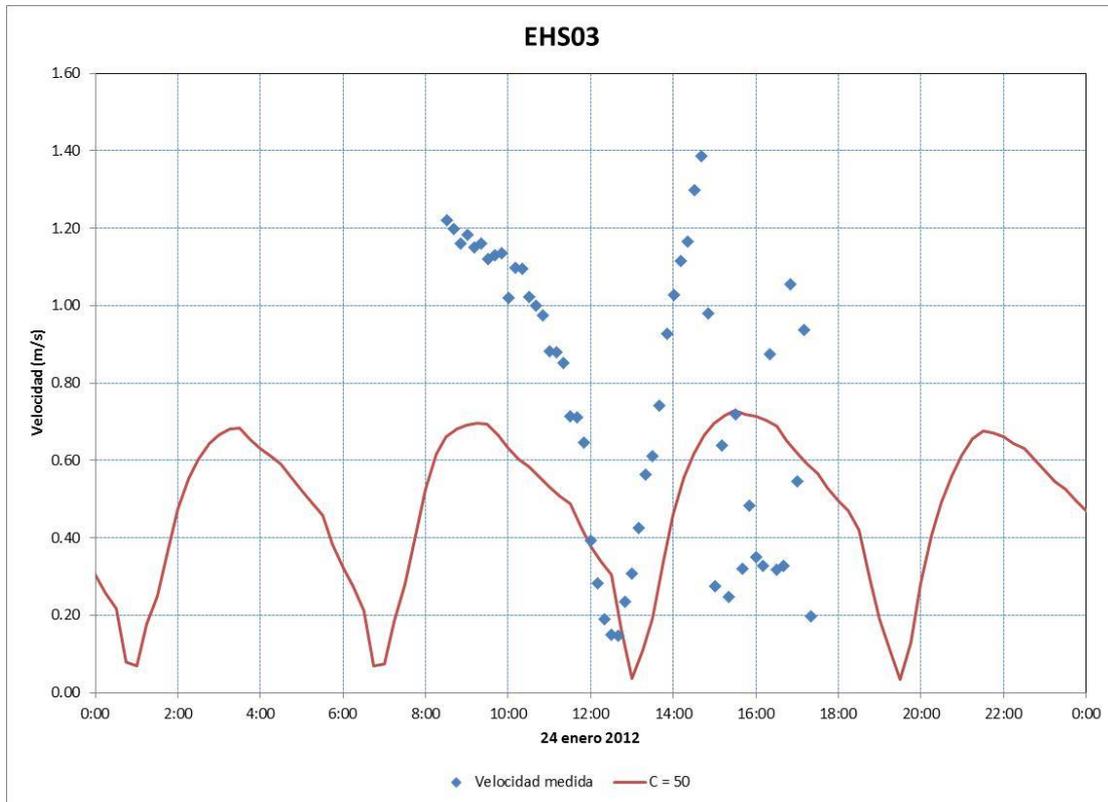
Figura 40. Comparación de velocidades en la estación EHS01. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en Posorja.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-47

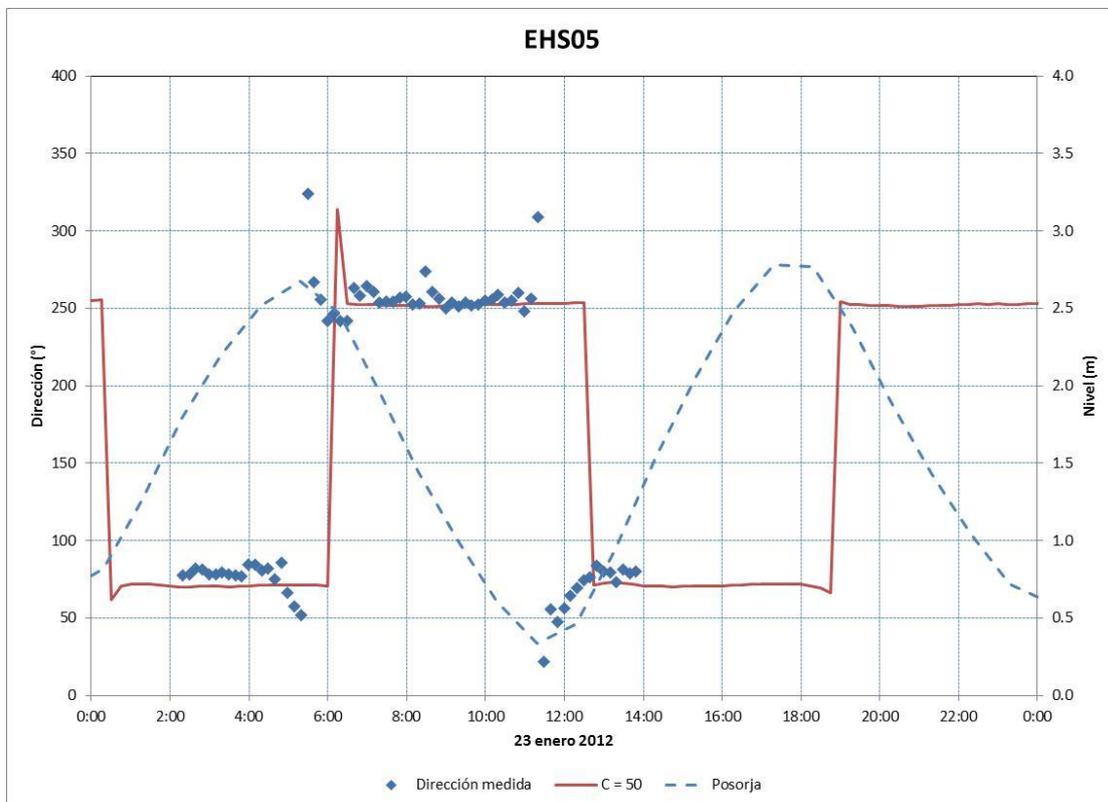
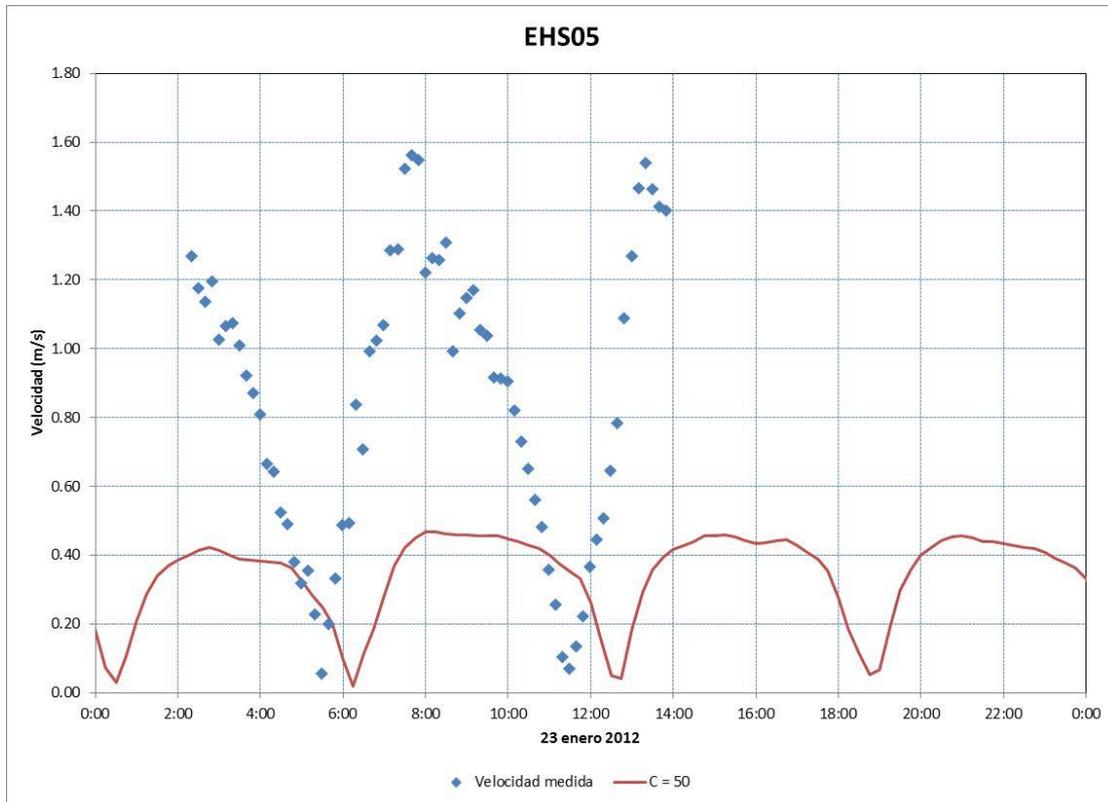
Figura 41. Comparación de velocidades en la estación EHS03. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en Posorja.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-48

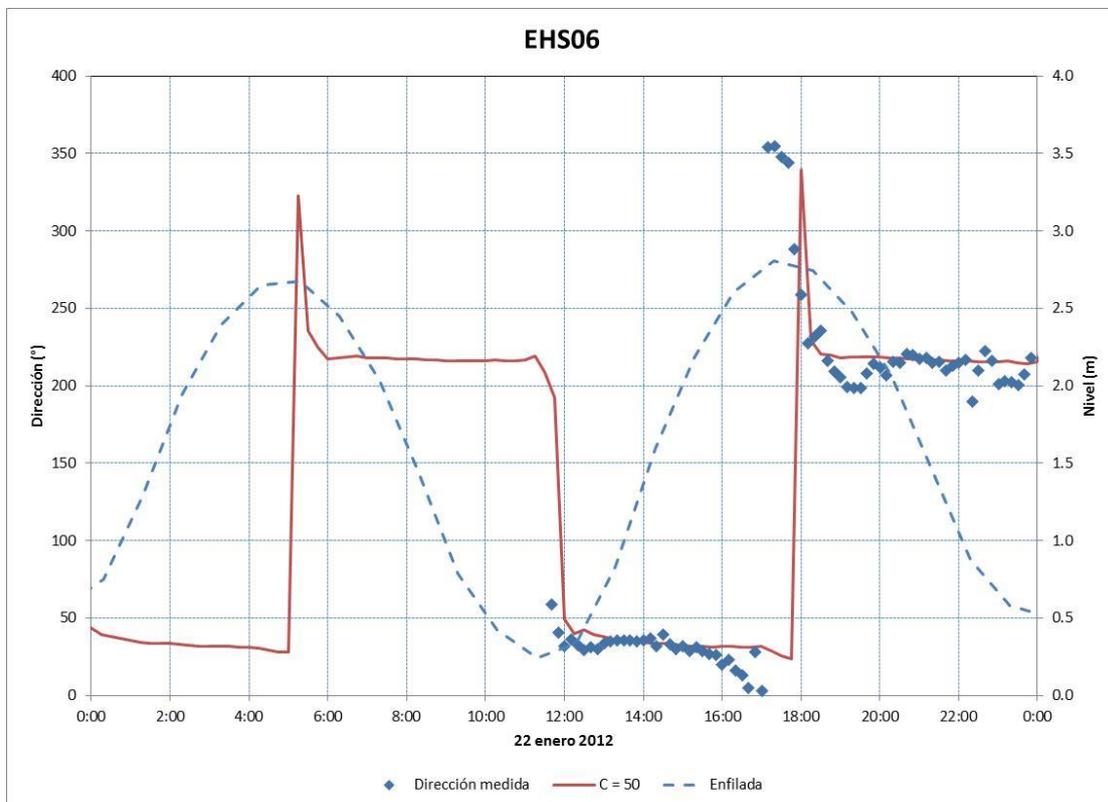
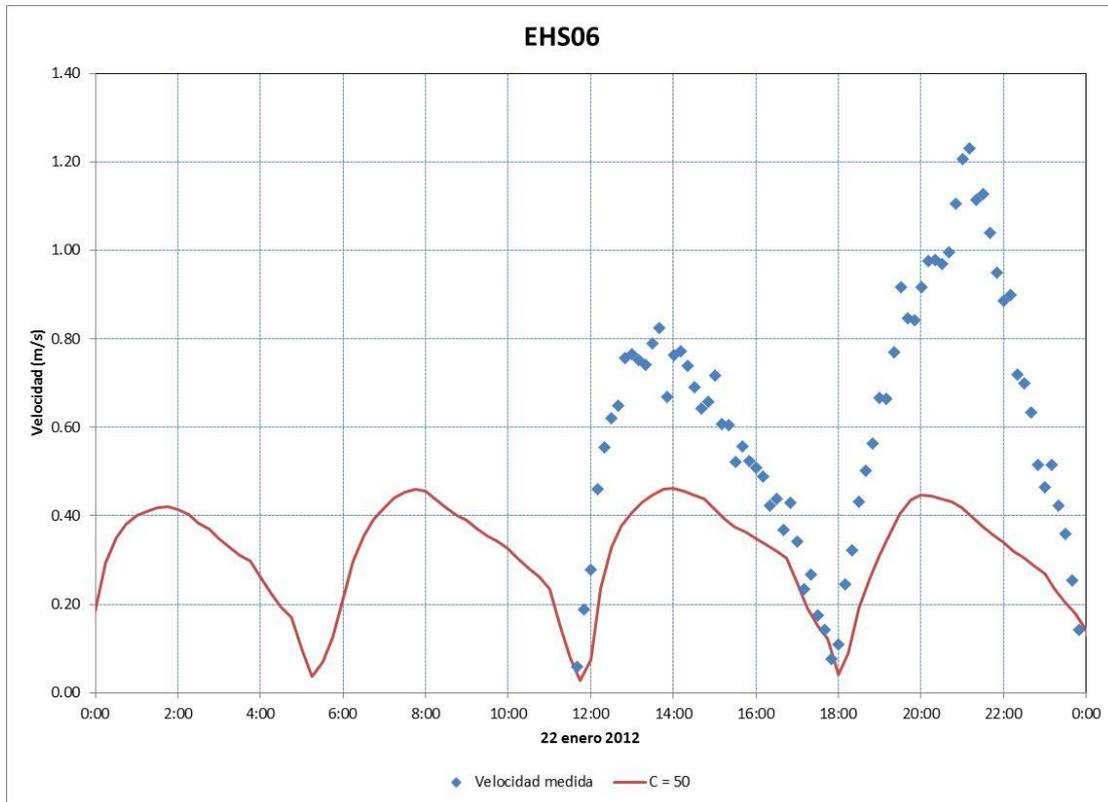
Figura 42. Comparación de velocidades en la estación EHS05. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en Posorja.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-49

Figura 43. Comparación de velocidades en la estación EHS06. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en la Enfilada C2.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-50



No obstante lo anterior, obsérvese que la dirección de la corriente se reproduce de manera satisfactoria en todas las estaciones, y aunque la intensidad de la corriente se subestima en la localización exacta de las estaciones EHS03, EHS05 y EHS06, la intensidad de la corriente se reproduce mejor en puntos cercanos a las mismas estaciones.

Por lo anterior, y recordando que en esta zona se reproducen bien los niveles medidos, se concluye que el modelo reproduce bastante bien la hidrodinámica del sistema Canal del Morro, Canal Cascajal, Estero Salado.

Compárense ahora los cálculos dentro del Estero Salado con la estación EHS08 y EHS10 (ver Figura 44 y Figura 45).

Obsérvese que al igual que en la mayoría de las estaciones la intensidad de la corriente se subestima y las direcciones de la corriente se reproducen correctamente.

Obsérvese en la estación EHS10 que los cálculos de la velocidad son bastante simétricos tanto en el flujo como en el refluo. Pero al igual que en la EHS06 las mediciones no son tan simétricas. En el caso de la EHS10 podría deberse a que se encuentra en la entrada / salida de uno de los canales del Golfo. Nótese que durante el flujo las velocidades se subestiman más que durante el refluo.

Atendiendo sólo el Estero Salado, se concluye que el modelo subestima las velocidades de la corriente principalmente durante el flujo, pero reproduce bien las direcciones.

Resumiendo, la magnitud de la velocidad se subestima en la mayoría de los casos

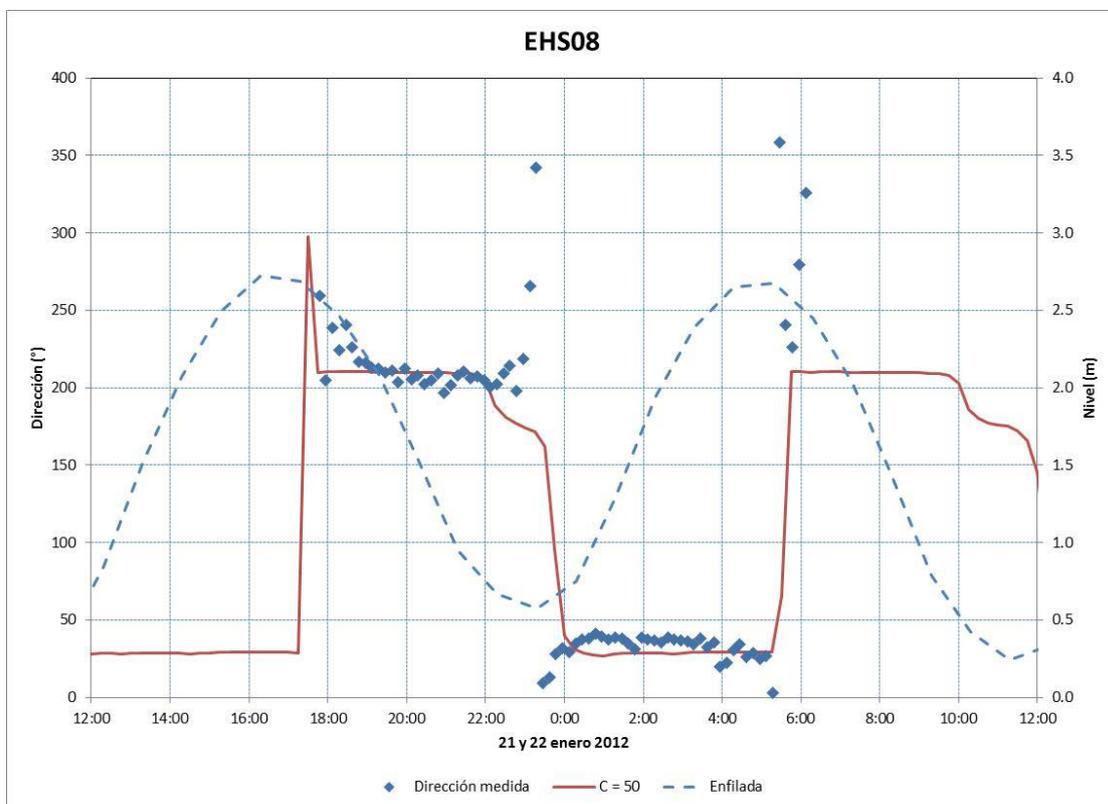
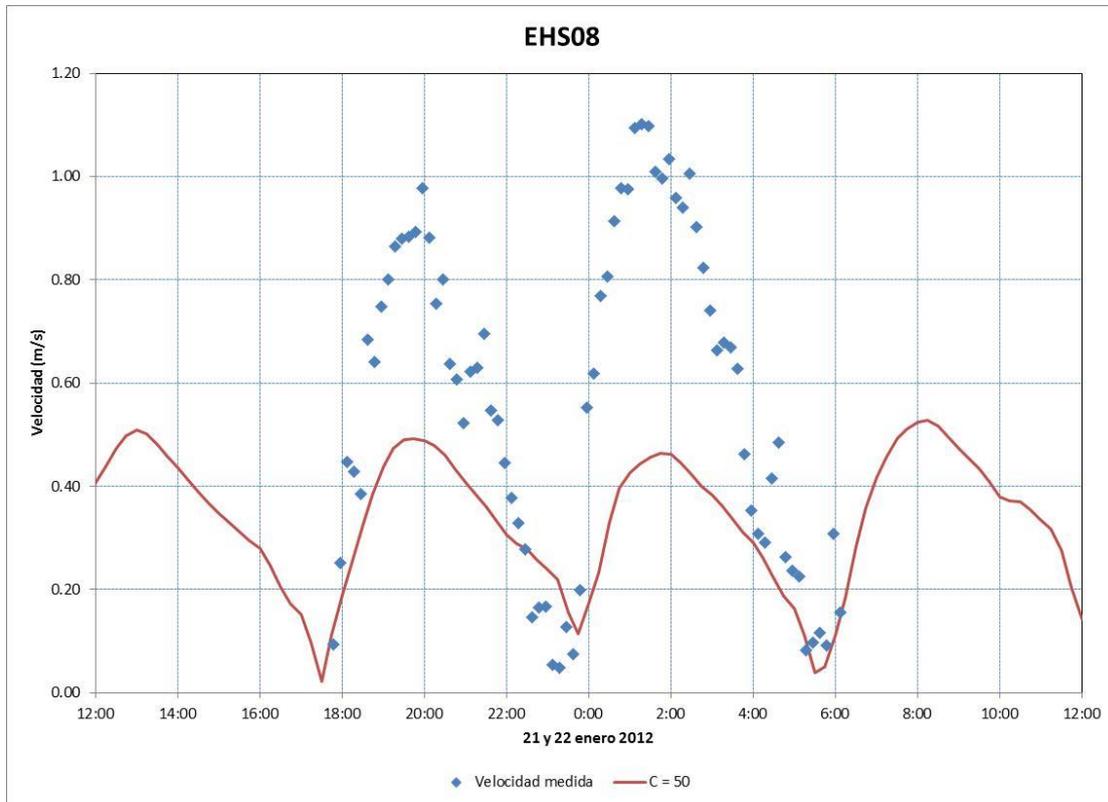
- EH01 se estima correctamente
- EH05 se subestima
- EH06 se subestima (más en el refluo)
- EH08 se subestima (más en el flujo)
- EH10 se subestima (más en el flujo)

Mientras que las direcciones de la velocidad se reproducen de manera correcta

- EH01 muy bien en el refluo
- EH05 muy bien en flujo y refluo
- EH06 muy bien en flujo y refluo
- EH08 muy bien en flujo y refluo
- EH10 muy bien en flujo

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-51

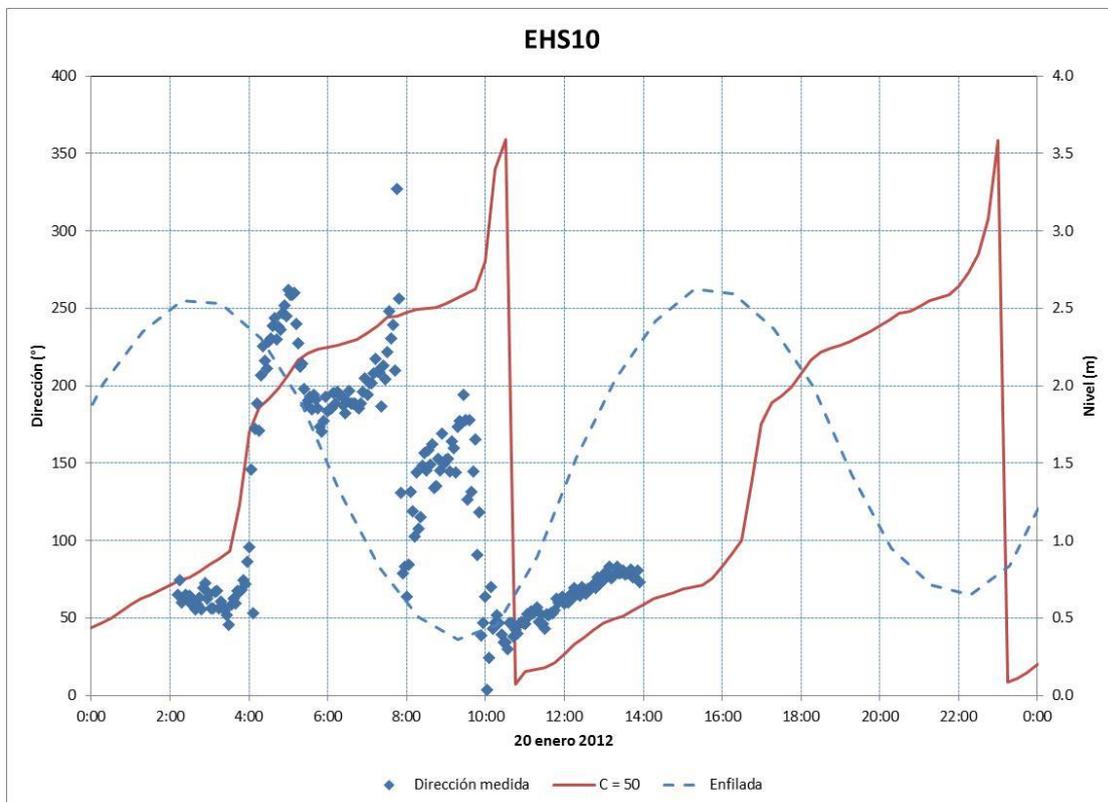
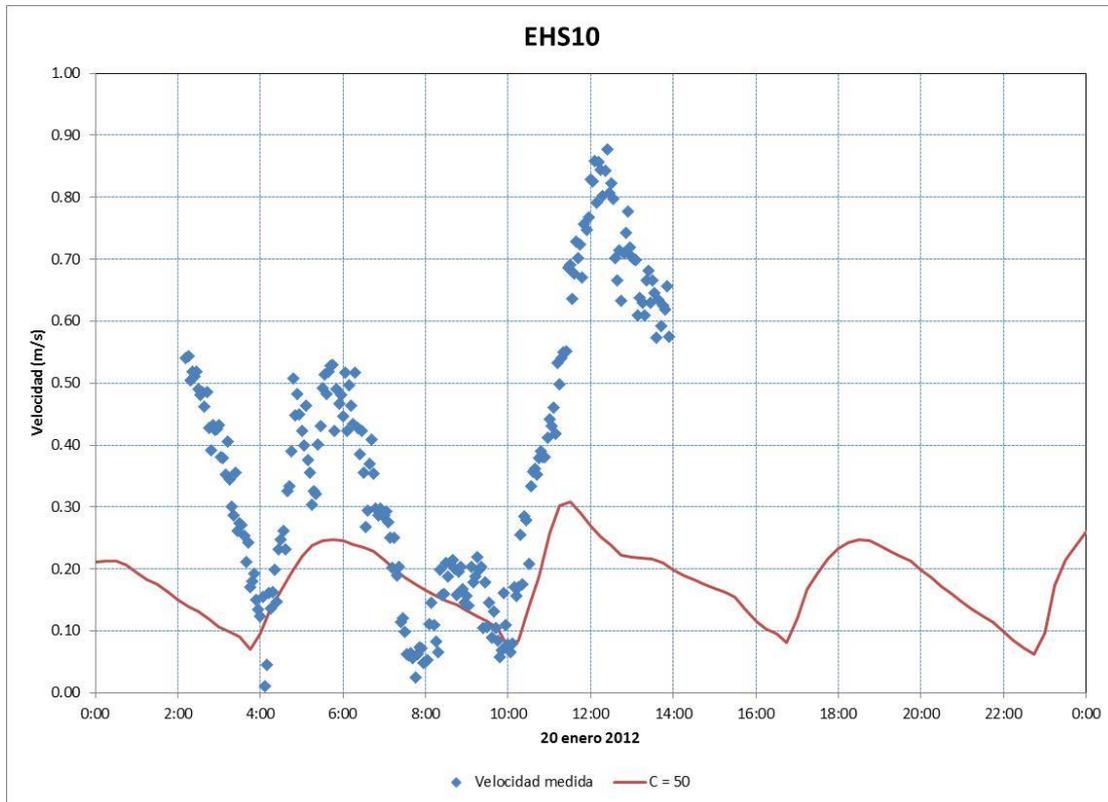
Figura 44. Comparación de velocidades en la estación EHS08. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en la Enfilada C2.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-52

Figura 45. Comparación de velocidades en la estación EHS10. Medido y calculado con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . En la parte superior se muestra la intensidad de la corriente y en la parte inferior se muestran la dirección de la corriente, así como el nivel del agua en la Enfilada C2.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-53

En las siguientes tablas se asienta el cálculo de la media cuadrática (RMS) de las diferencias entre las velocidades (magnitud y dirección) medidas y calculadas con  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  en las estaciones hidrográficas EHS01, EHS03, EHS05, EHS06, EHS07, EHS08, EHS09 y EHS10. Estas diferencias constituyen el error medio cuadrático del modelo y sirven para medir el grado de ajuste del modelo.

Obsérvese que el error más pequeño en la magnitud de la velocidad se comete en la estación EHS01 (28%) y el más grande en EHS05 (43%). El promedio de esta medida en las ocho estaciones es del 34%.

El error medio cuadrático que se comete en el cálculo de la dirección de la corriente es menor. El error más pequeño ocurre en la estación EHS03 (19%) y el más grande ocurre nuevamente en EHS05 (32%). El promedio de esta medida en las ocho estaciones es del 26%.

**Tabla 6. Cálculo de la media cuadrática (RMS) de las diferencias entre la magnitud de la velocidad medida y calculada ( $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ) en las estaciones EHS01, EHS03, EHS05, EHS06, EHS07, EHS08, EHS09 y EHS10.**

	Amplitud max (m/s)	RMS (m/s)	RMS (%)
EHS01	0.78	0.22	28%
EHS03	1.15	0.39	34%
EHS05	1.47	0.63	43%
EHS06	1.10	0.37	34%
EHS07	1.05	0.32	30%
EHS08	1.00	0.34	34%
EHS09	0.97	0.33	34%
EHS10	0.82	0.27	33%

Fuente: Grupo de Trabajo 2012

**Tabla 7. Cálculo de la media cuadrática (RMS) de las diferencias entre la dirección de la velocidad medida y calculada ( $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ) en las estaciones EHS01, EHS03, EHS05, EHS06, EHS07, EHS08, EHS09 y EHS10.**

	Amplitud max (m/s)	RMS (m/s)	RMS (%)
EHS01	359.23	110.60	31%
EHS03	278.22	53.45	19%
EHS05	302.25	97.54	32%
EHS06	345.19	68.77	20%
EHS07	207.67	44.00	21%
EHS08	349.21	68.93	20%
EHS09	222.25	69.87	31%
EHS10	292.76	91.70	31%

Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Por todo lo anterior, se concluye que el modelo reproduce bastante bien la hidrodinámica del sistema (7% de error en los niveles, 26% de error en la dirección de la velocidad y 34% de error en la estimación de la magnitud de la velocidad),



especialmente en la zona del Canal del Morro, Canal Cascajal y Estero Salado (3% de error en la estimación de los niveles).

Entre las posibles razones que influyen en la falta de precisión se encuentran:

- Batimetría incompleta
  - No se tiene la información de los canales del Golfo
  - No se tiene la información de los esteros que descargan en el Estero Salado
  - No se define correctamente la Cota de las zonas que descubren en bajamar
- Hidrología incompleta
  - Río Guayas
  - Esteros que descargan en el Estero Salado
- Información desfasada
  - La batimetría del Estero Salado y Cascajal corresponde a septiembre de 2009
  - La batimetría del Río Guayas corresponde a noviembre 2010
  - La batimetría del canal de navegación corresponde a Marzo del 2011
  - La información hidrodinámica corresponde a enero de 2012.
- Falta de información hidrodinámica
  - Niveles y velocidades en el Río Guayas y canal Jambelí
- Falta de información en las nuevas áreas que se incluyeron en el Modelo por las razones expuestas anteriormente

### **16.6.3. Comparación de concentración de sedimentos y azolvamiento del canal de navegación**

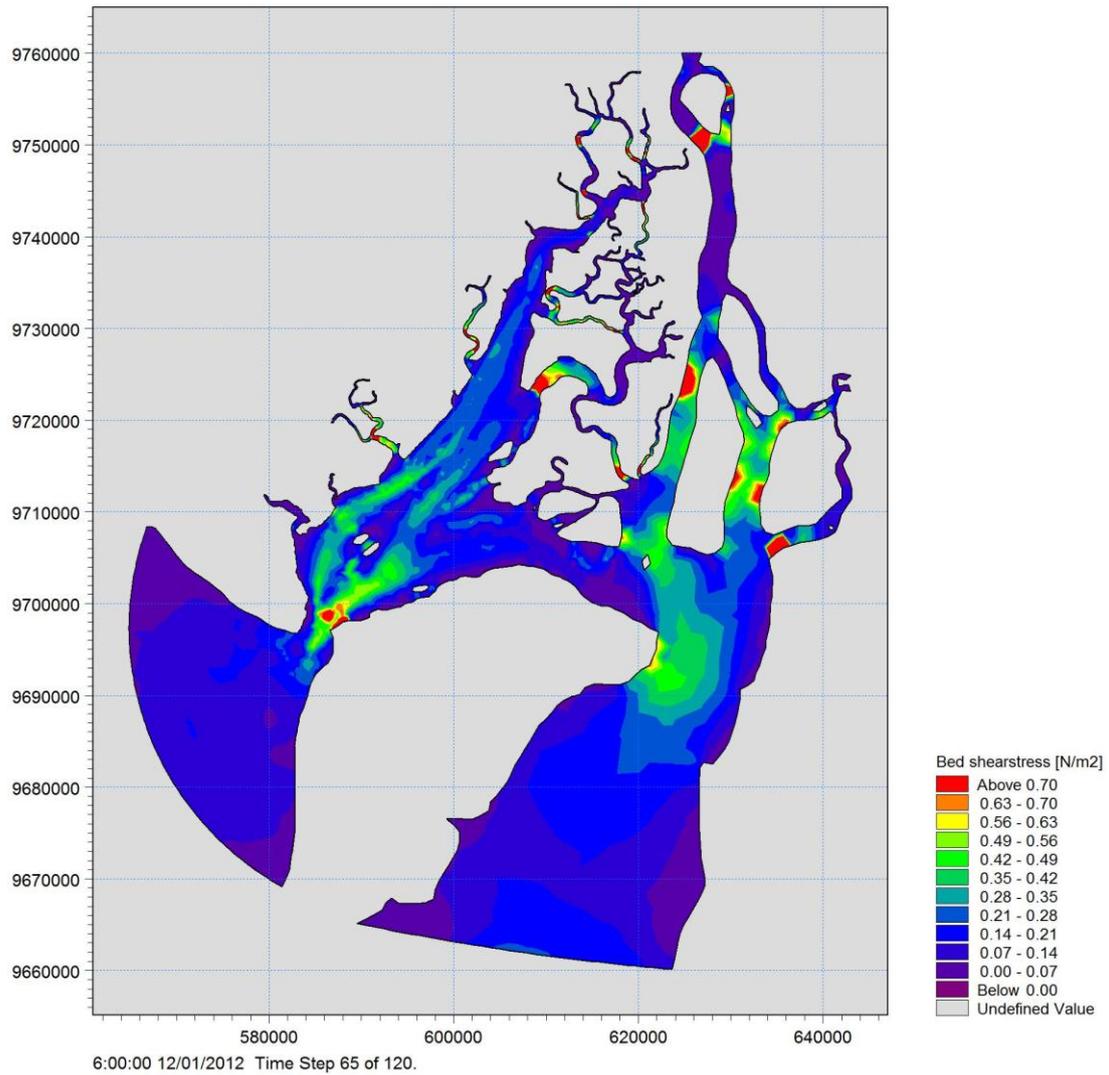
Para la calibración del modelo de transporte se usa un dominio temporal más grande, de 30 días, el cual va del 27 de diciembre de 2011 a las 0h00 al 26 de enero de 2012 a las 0h00.

#### **16.6.3.1. Esfuerzo cortante que ejerce el flujo en el fondo**

En la Figura 46 se muestra el cálculo del esfuerzo cortante que ejerce el flujo en el fondo en todo el dominio de cálculo durante el flujo. Nótese que la magnitud del esfuerzo cortante de fondo es relativamente alto dentro del canal de navegación, en el tronco del Estero Chupadores Grande y Estero Salado, y al sur de las Islas Manglecito Grande y Chico.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-55

Figura 46. Esfuerzo cortante de fondo durante el flujo, 12 de enero de 2012 a las 6:00.

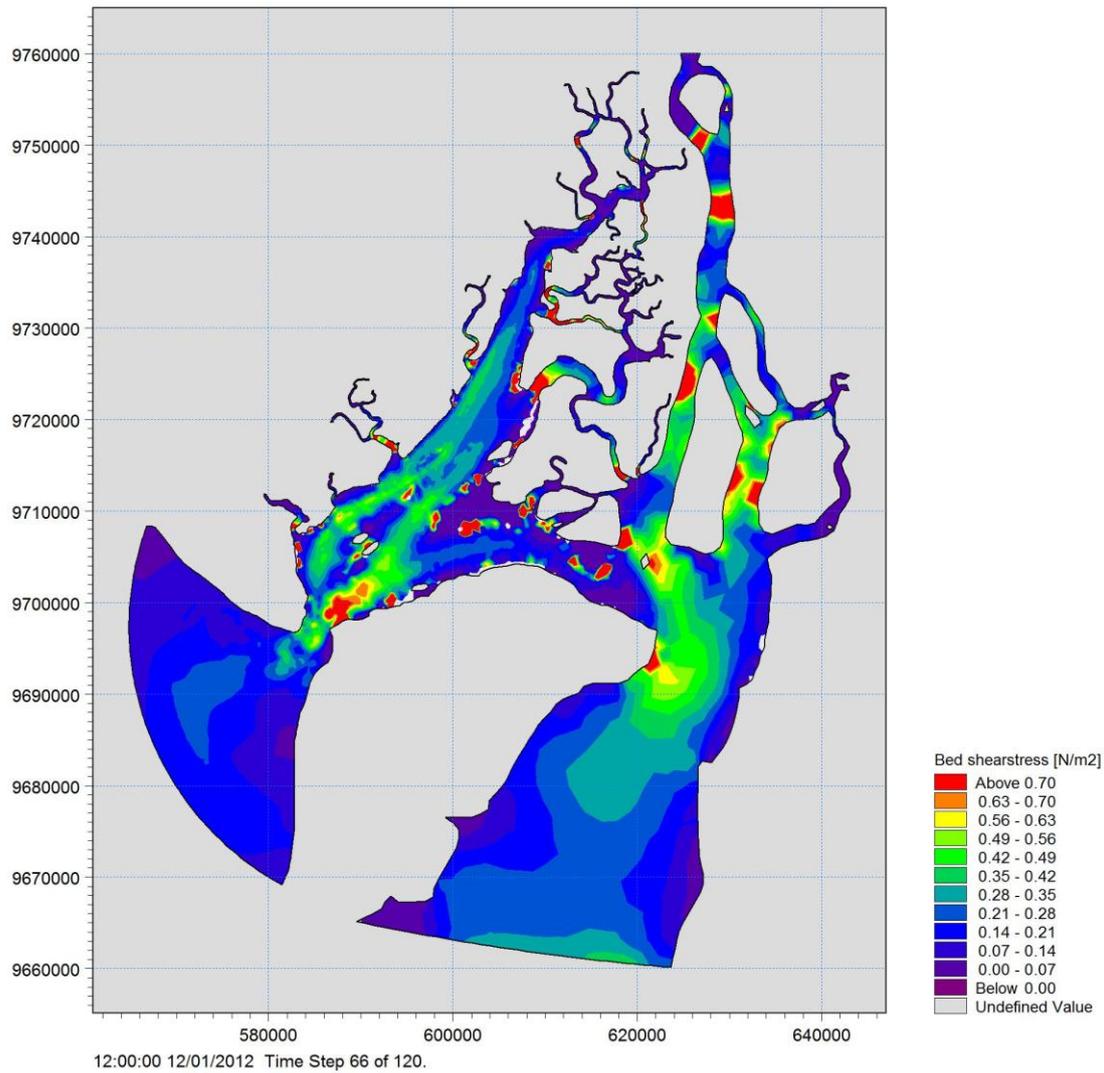


Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En la Figura 47 se muestra el cálculo del esfuerzo cortante que ejerce el flujo en el fondo en todo el dominio de cálculo durante el reflujó. Nótese que la magnitud del esfuerzo cortante de fondo es relativamente alto dentro del canal de navegaci3n, en el entronque del Estero Chupadores Grande y Estero Salado, al sur de las Islas Manglecito Grande y Chico, y en el Canal Cascajal.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Dise1o para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisi3n: 1	P1gina
Asociaci3n Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-56

Figura 47. Esfuerzo cortante de fondo durante el reflujo, 12 de enero de 2012 a las 12:00.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

A fin de conocer con mayor precisión lo que sucede dentro del canal de navegación, en la Figura 48 se muestra el cálculo del esfuerzo cortante que ejerce el flujo en el fondo a lo largo del canal de navegación durante el flujo y el reflujo. Nótese que: la magnitud del esfuerzo es similar durante el flujo y en el reflujo; el esfuerzo cortante es máximo entre las boyas 13 a 33, mayor a  $0,5 \text{ N/m}^2$ ; le sigue el tramo entre las boyas 33 a 66, donde el esfuerzo cortante es del orden de  $0,30 \text{ N/m}^2$ ; y en el resto del canal el esfuerzo es menor a  $0,20 \text{ N/m}^2$ .

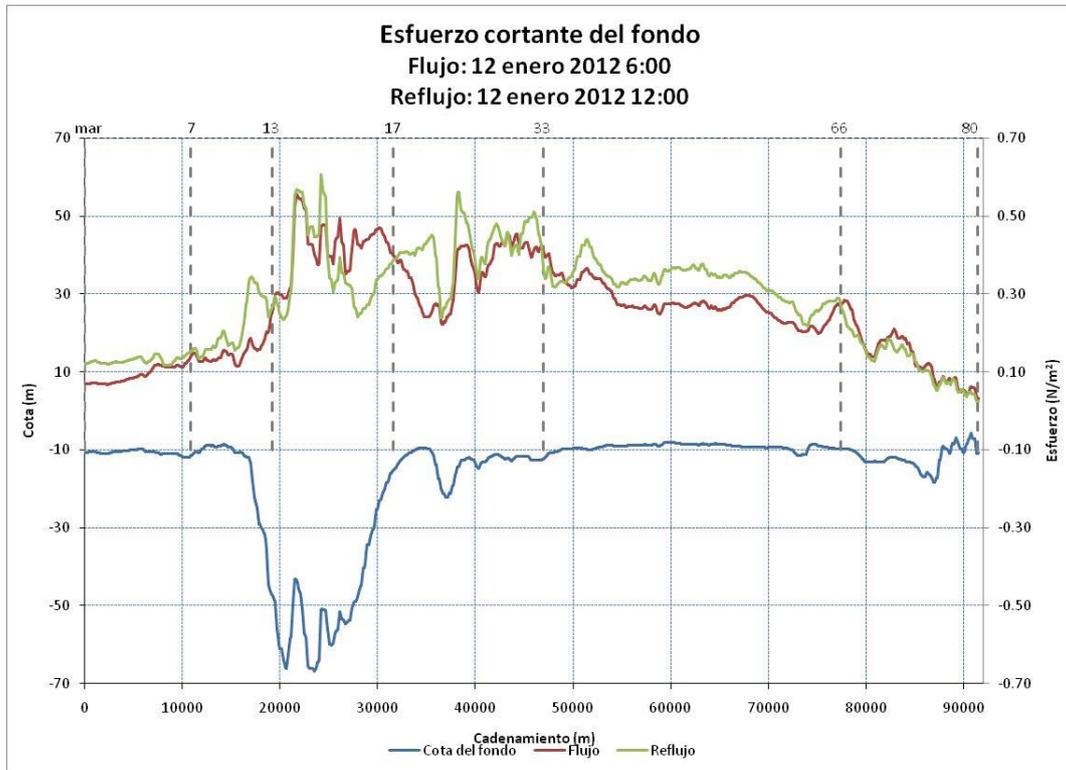
Según puede observarse en el modelo utilizado para el cálculo de la erosión (acápites 16.8), a mayor sea el esfuerzo cortante que ejerce el flujo sobre el fondo, mayor es la cantidad de sedimentos que se ponen en suspensión y que pueden mantenerse en suspensión (menor es la cantidad de sedimentos que se depositan). En el caso de material limoso con diámetro de  $0,05 \text{ mm}$  y densidad de  $2.650 \text{ kg/m}^3$ :

- El esfuerzo crítico de depósito (valores menores hacen que la partícula se deposite), según las fórmulas de Engelund & Fredsoe, es de  $0,005 \text{ N/m}^2$ . Este parámetro es sujeto a calibración. En el modelo se supuso igual a  $0,1 \text{ N/m}^2$ .

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultoría	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-57

- El esfuerzo crítico de erosión (valores mayores hacen que la partícula se ponga en movimiento), según la teoría de Shields, es de 0,158 N/m<sup>2</sup>.

**Figura 48. Esfuerzo cortante de fondo a lo largo del canal de navegación durante el flujo y el refluo del 12 de enero de 2012 a las 6:00 y a las 12:00, respectivamente. Se muestra también la configuración del fondo para referencia.**

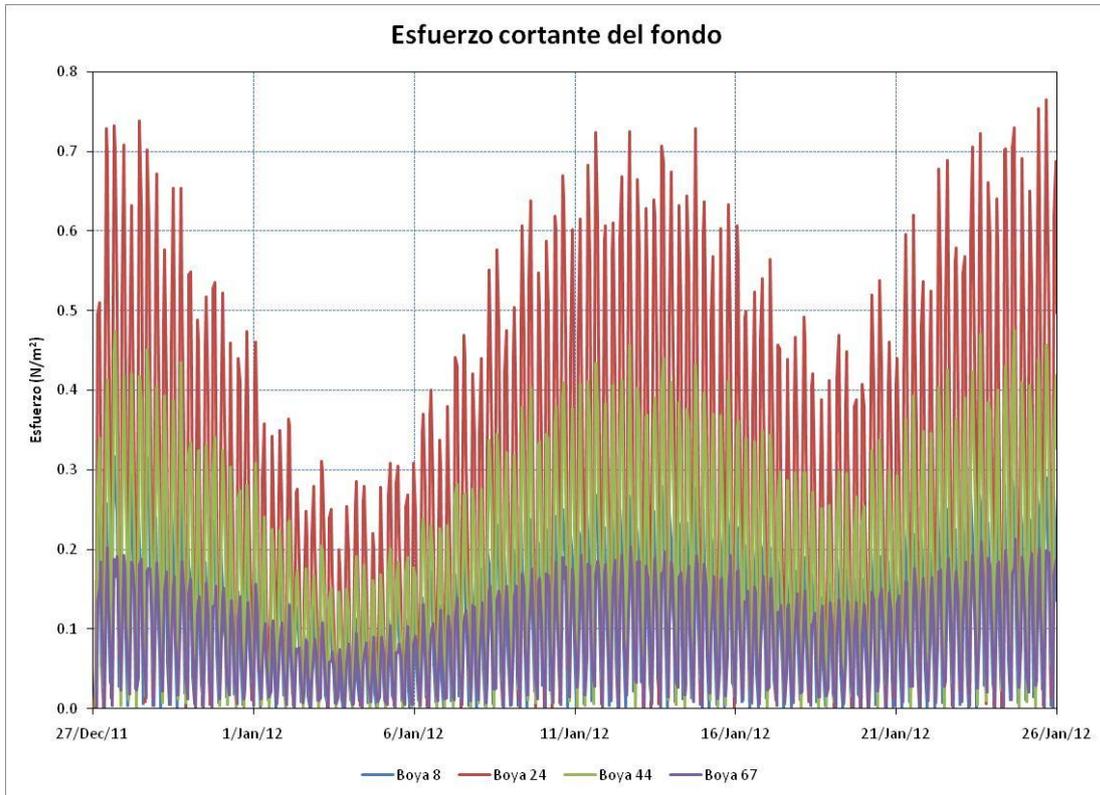


**Fuente: Grupo de Trabajo 2012**

A fin de conocer con mayor precisión la manera en que se comporta esta variable a lo largo del tiempo, en la Figura 49 se muestra el cálculo del esfuerzo cortante que ejerce el flujo en el fondo en cuatro puntos del canal de navegación. Nótese que la magnitud del esfuerzo cortante varía con la marea a lo largo del día y del mes. Por ejemplo, alrededor de la boya 24, unos días el esfuerzo cortante de fondo puede llegar a tener valores mayores a 0,7 N/m<sup>2</sup>, y en otros, no llegar siquiera a 0,3 N/m<sup>2</sup>.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-58

Figura 49. Esfuerzo cortante de fondo sobre el canal de navegación a la altura de las boyas 8 (12+500), 24 (38+400), 44 (54+400) y 67 (80+900).



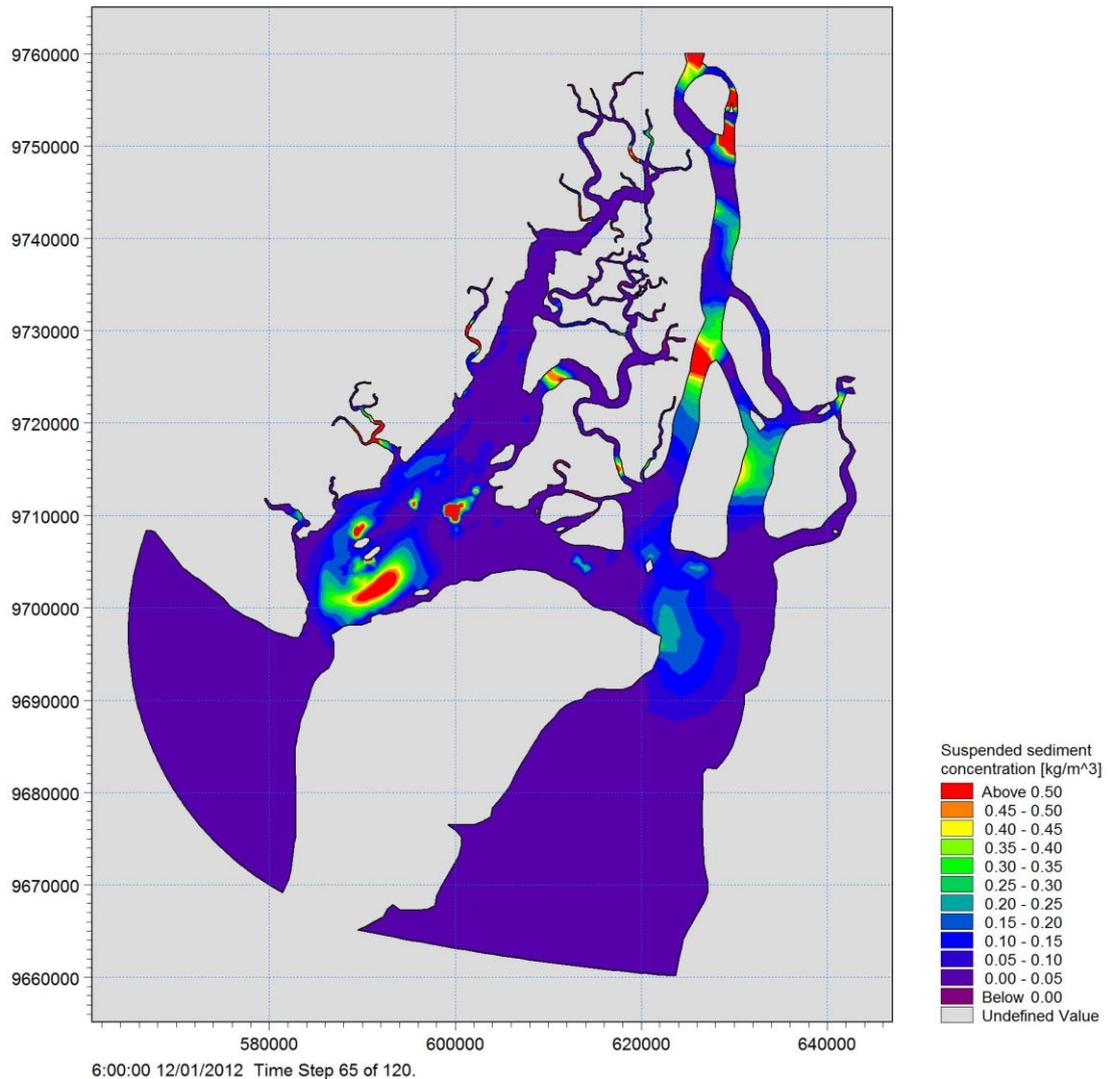
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

### 16.6.3.2. Concentración de sólidos en suspensión

En la Figura 50 se muestra el mapa de la concentración de sólidos en suspensión durante el flujo que tiene lugar el 12 de enero de 2012 a las 6:00. Nótese que en las zonas donde el esfuerzo cortante de fondo es alto, el flujo es capaz de poner y mantener sólidos en suspensión.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-59

Figura 50. Concentración de sólidos en suspensión durante el flujo, 12 de enero de 2012 a las 6:00.

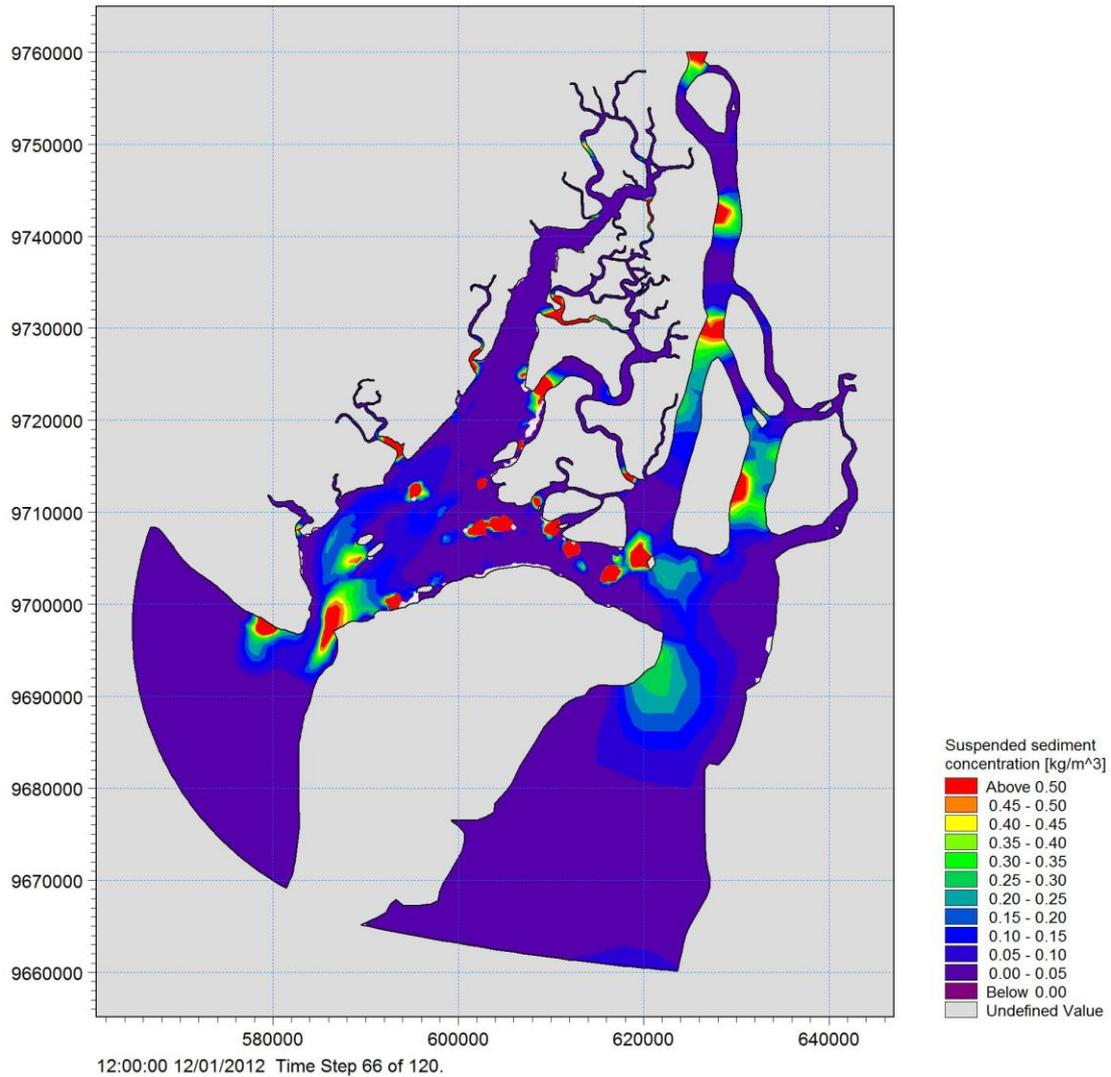


Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En la Figura 51 se muestra un mapa de la concentración de sólidos en suspensión en durante el refluo que tiene lugar el 12 de enero de 2012 a las 12:00. Nótese que la concentración de sólidos en suspensión: disminuye alrededor de las Islas Manglecito Grande y Chico, respecto a la que se presenta durante el flujo; y se incrementa a las orillas del Canal Cascajal y en las conexiones de los esteros con el Estero Salado, especialmente en la del Estero Chupadores Grande.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-60

Figura 51. Concentración de sólidos en suspensión durante el refluo, 12 de enero de 2012 a las 12:00.

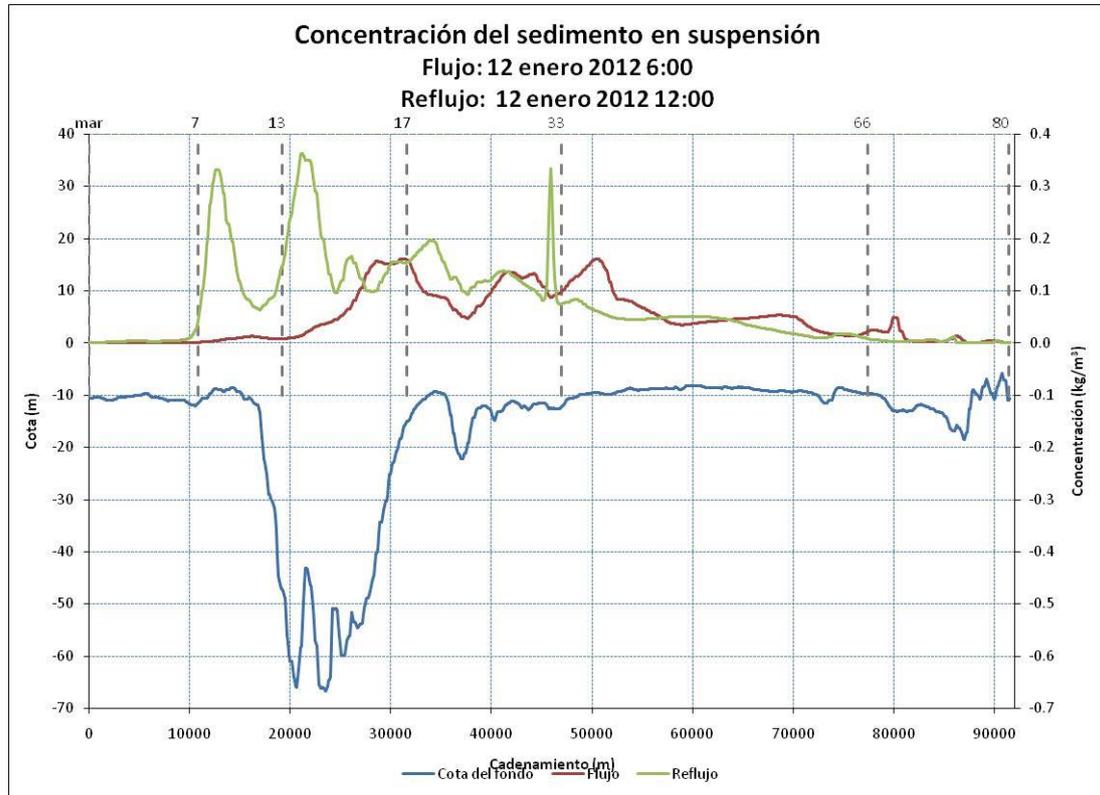


Fuente: Grupo de Trabajo 2012

A fin de conocer con mayor precisión lo que sucede dentro del canal de navegación, en la Figura 48 se muestra la concentración de sólidos en suspensión a lo largo del canal de navegación durante el flujo y el refluo. Nótese que la concentración de sólidos en suspensión: es similar durante el flujo y en el refluo, excepto en la zona comprendida entre las boyas 7 y 17, donde la concentración de sólidos en suspensión es sensiblemente más alta durante el refluo; durante el refluo es máxima entre las boyas 7 a 13, con concentraciones mayores a 0,3 kg/m<sup>3</sup>; durante el flujo es máxima entre las boyas 17 a 33, con concentraciones mayores a 0,1 kg/m<sup>3</sup>; en el resto del canal las concentraciones se mantienen por debajo de los 0,05 kg/m<sup>3</sup>.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-61

**Figura 52. Concentración de sólidos en suspensión a lo largo del canal de navegación durante el flujo y el reflujó del 12 de enero de 2012 a las 6:00 y a las 12:00, respectivamente. Se muestra también la configuración del fondo para referencia.**

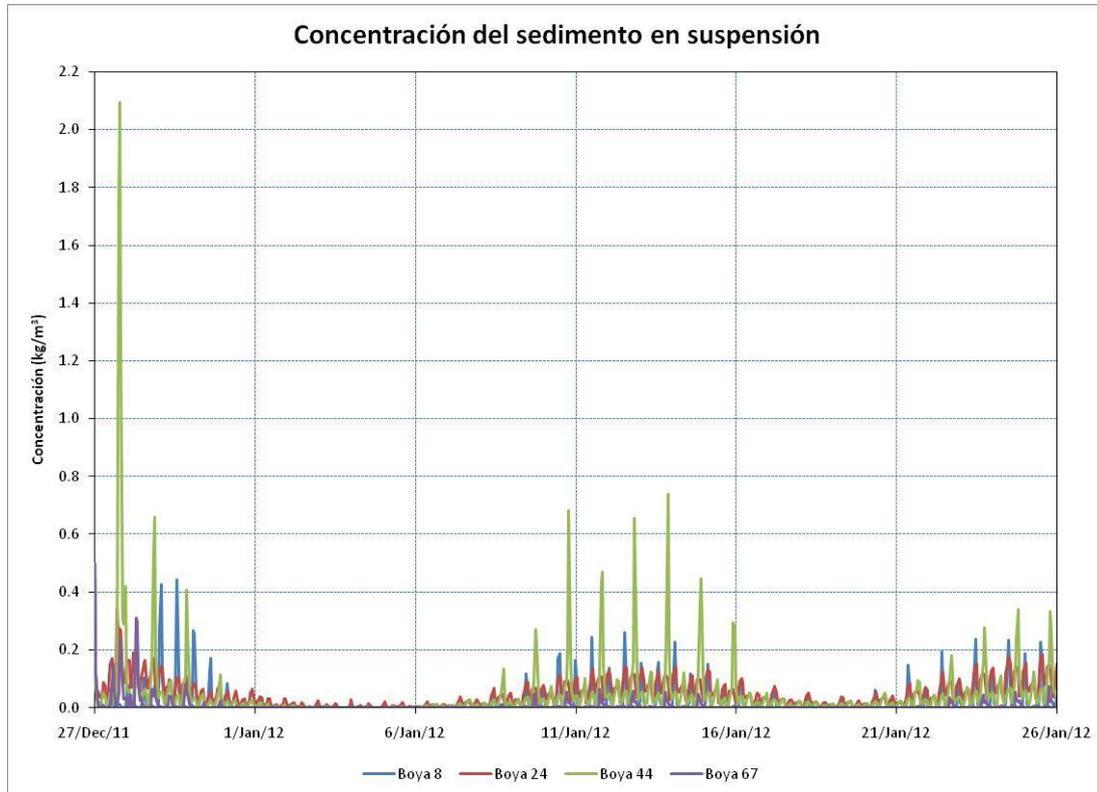


**Fuente: Grupo de Trabajo 2012**

A fin de conocer con mayor precisión la manera en que se comporta esta variable a lo largo del tiempo, en la Figura 49 se muestra la concentración de sólidos en suspensión en cuatro puntos del canal de navegación. Nótese que la concentración de sólidos en suspensión varía con la marea a lo largo del día y del mes, al igual que el esfuerzo cortante de fondo. Por ejemplo, alrededor de la boya 44, unos días la concentración puede llegar a tener valores mayores a  $0,6 \text{ kg/m}^3$ , y en otros, no llegar siquiera a  $0,1 \text{ kg/m}^3$ .

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-62

Figura 53. Concentración de sólidos en suspensión sobre el canal de navegación a la altura de las boyas 8 (12+500), 24 (38+400), 44 (54+400) y 67 (80+900).



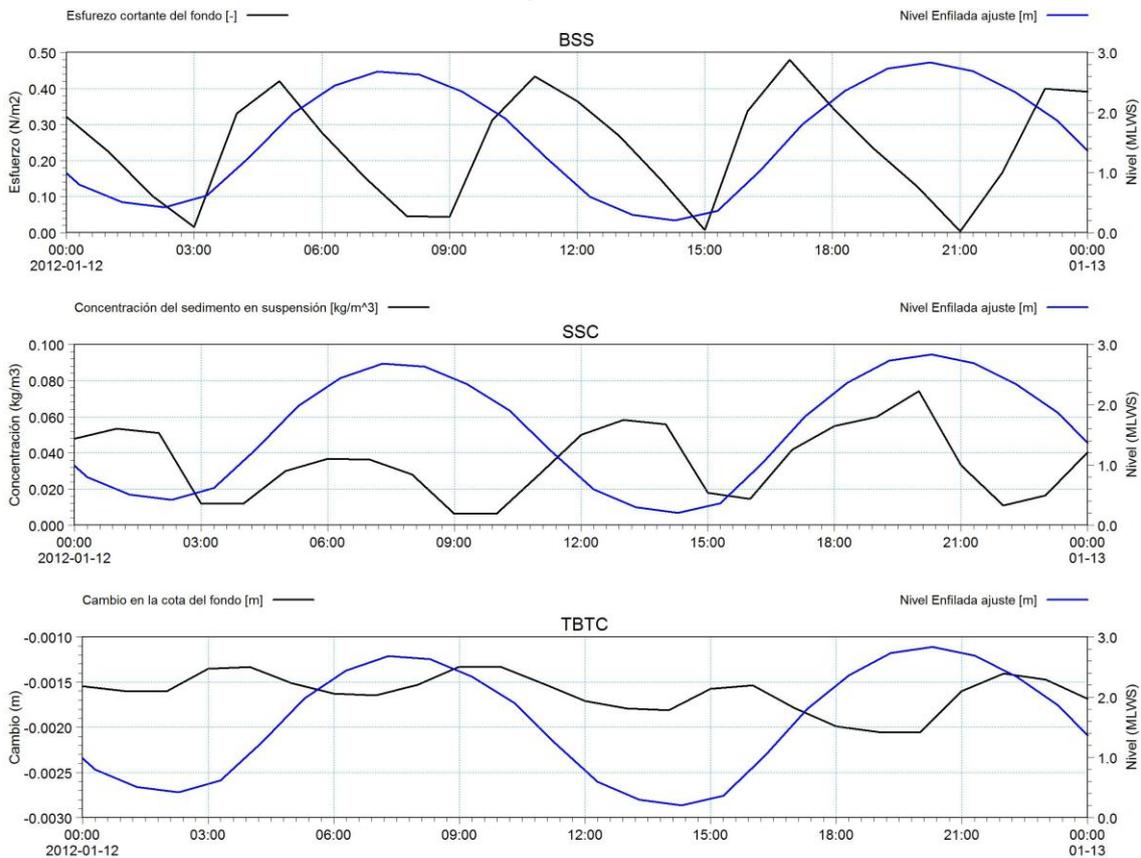
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

### 16.6.3.3. Cambio total del espesor de la capa de fondo

En la Figura 54 se comparan cuatro variables hacia la mitad del periodo de simulación (12 de enero de 2012), tres de transporte y una hidrodinámica: el comportamiento del esfuerzo cortante que ejerce el flujo en la capa de fondo, la concentración de sólidos en suspensión, el cambio en el espesor de la capa de fondo sobre el canal de navegación a la altura de las boyas 48, y el nivel del agua en la estación Enfilada C2. Obsérvese que: el esfuerzo cortante sobre la capa de fondo oscila con la misma frecuencia que la marea, pero con un desfase aproximado de 3 horas (como esta variable no toma en cuenta la dirección de la corriente siempre es positiva y parece tener un periodo menor al de la marea); el esfuerzo cortante es casi cero durante la pleamar y la bajamar debido a que las velocidades son mínimas; el esfuerzo cortante es máximo cuando la marea está en ascenso y en descenso; la concentración de sólidos en suspensión aumenta cuando el esfuerzo en el fondo es mayor al esfuerzo crítico ( $0,158 \text{ N/m}^2$ ); el máximo de la concentración de sólidos en suspensión está desfasada del máximo del esfuerzo cortante del orden de 2 horas; el espesor de la capa de fondo aumenta cuando disminuye la concentración de sólidos en suspensión y disminuye cuando la concentración de sólidos en suspensión aumenta.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-63

**Figura 54. Comparación del comportamiento del esfuerzo en la capa de fondo (BSS), la concentración de sólidos en suspensión (SSC) y el cambio en el espesor de la capa de fondo (TBTC) sobre el canal de navegación a la altura de las boya 48, hacia la mitad del periodo de simulación (12 de enero 2012). Se muestra también el nivel del agua en la estación Enfilada C2.**

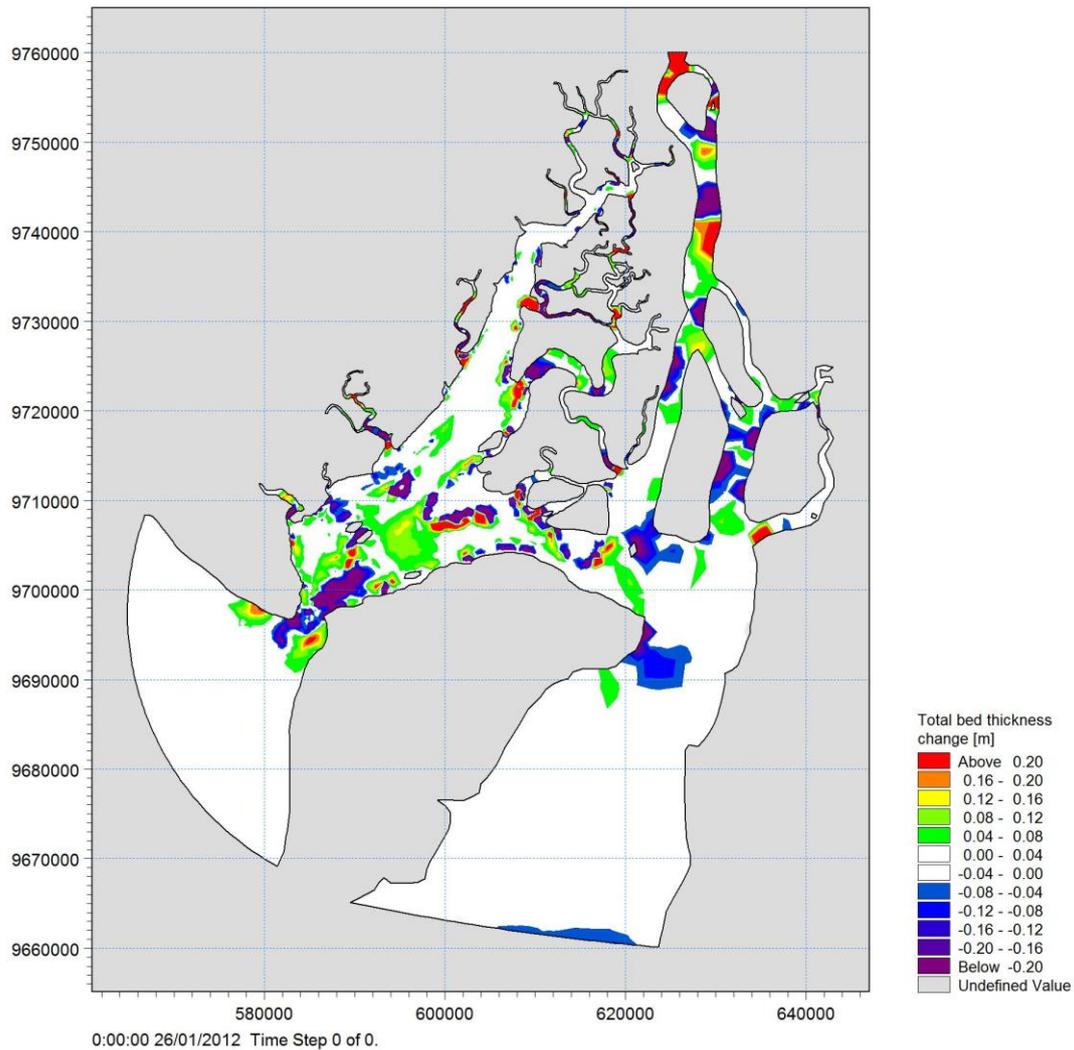


Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En la Figura 55 se muestra un mapa del cambio total en el espesor de la capa de fondo en todo el dominio hacia el final de la simulación (30 días). Nótese en azul las zonas de erosión: al Sur y al Noroeste de las Islas Manglecito Grande y Chico, alrededor de la boya 33, en las orillas del Canal Cascajal, en la conexión del Estero Chupadores Grande con el Estero Salado. En contraste, obsérvense en tonos de rojo las zonas de depósito, las cuales se encuentran adyacentes a las de erosión: márgenes del Estero Salado, centro del Canal Cascajal; al Este de las Islas Manglecito Grande y Chico.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-64

Figura 55. Cambio total en el espesor de la capa de fondo al final de los 30 días de simulación.

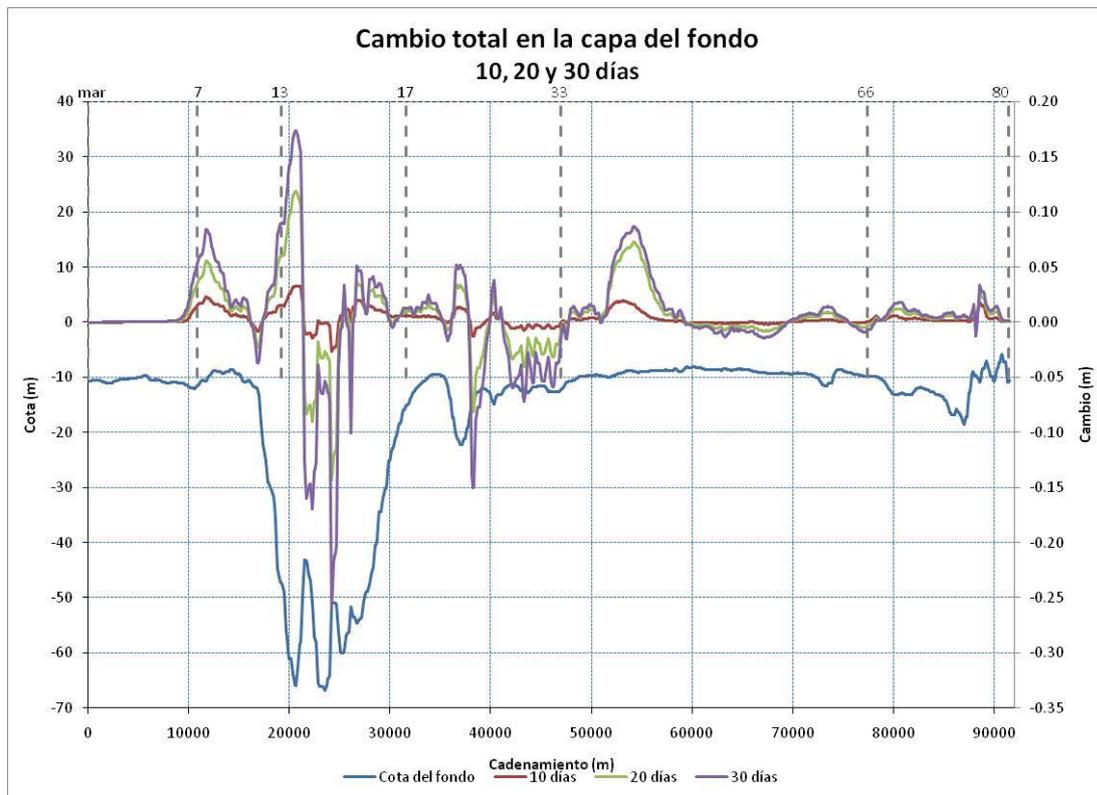


Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En la Figura 57 se muestra el cambio en el espesor de la capa de fondo a lo largo del canal de navegación en tres momentos: 10, 20 y 30 días. Nótese que: las zonas de depósito y erosión se alternan; las zonas de mayor azolvamiento se encuentran alrededor de la boya 7, 13 y 44 (abscisa 54+400); las zonas de mayor erosión se localizan alrededor de la boya 15A (abscisa 25+000) y la boya 32 (abscisa 45+450); los cambios más fuertes (depósito y erosión) ocurren en la zona más profunda; los principales cambios ocurren entre el día 10 y 20, días en los cuáles se presenta un incremento del esfuerzo cortante de fondo (ver Figura 49).

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-65

Figura 56. Cambio en el espesor de la capa de fondo a lo largo del canal de navegación después de 10, 20 y 30 días de simulación.



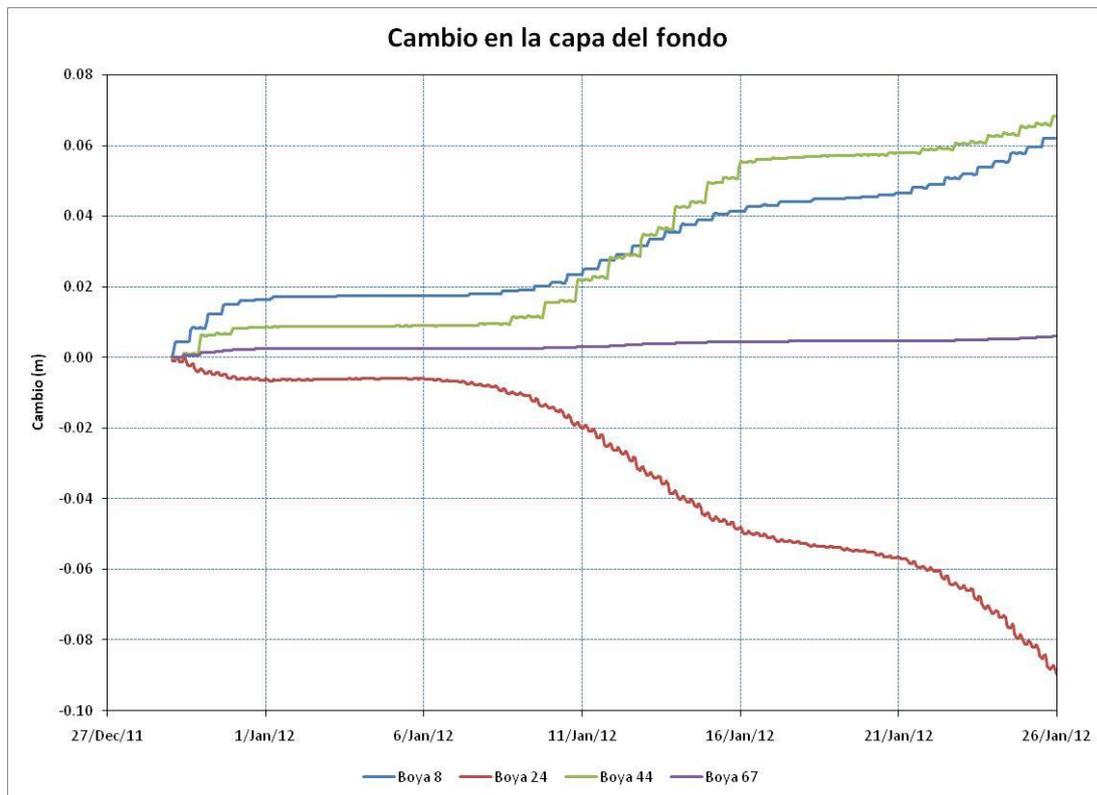
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Con el fin de visualizar mejor la manera en que se comporta esta variable con el tiempo, en la A fin de observar mejor el efecto del dragado en el proceso de azolvamiento del canal de navegación, en la Figura 77 se muestra el cambio total en el espesor de la capa de fondo en la boya 44 para diferentes cotas de dragado del canal de navegación: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m. Nótese que las diferencias son mínimas, pero éstas se acrecientan en la medida que se profundiza el canal.

Figura 77 se muestra el cambio en el espesor de la capa de fondo sobre el canal de navegación a la altura de las boyas 8, 24, 44 y 67, a lo largo de los 30 días de simulación. Obsérvese que el cambio en el espesor de la capa de fondo: se contabiliza a partir del segundo día de cálculo, ya que esta variable guarda la historia de la erosión y el azolvamiento en un punto y, como se determinó en la simulación de prueba, por lo menos los tres primeros periodos de marea están “contaminados” por la condición inicial; durante los primeros 10 días los cambios son mínimos porque el esfuerzo cortante de fondo disminuye paulatinamente (ver Figura 49); entre el día 10 y 20 se incrementa de manera significativa el azolvamiento y la erosión, debido al incremento del esfuerzo cortante de fondo que ocurre durante estos días (ver Figura 49); muestra un azolvamiento similar en las boyas 8 y 44; muestra un azolvamiento, pero muy pequeño, en la boya 67; muestra una erosión significativa en la boya 24.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-66

Figura 57. Cambio en el espesor de la capa de fondo sobre el canal de navegación a la altura de las boyas 8, 24, 44 y 67, a lo largo de los 30 días de simulación.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

De todo lo anterior se desprende que las fuentes de sedimentos cohesivos que azolvan el Estero Salado y eventualmente ocasionan el azolvamiento del canal de navegación se localizan en los esteros al Este y Oeste del Estero Salado y en los bajos alrededor de las Islas Manglecito Grande y Chico.

#### 16.6.3.4. Cálculo del volumen de azolvamiento por tramo

En la Tabla 8 se comparan las tasas de sedimentación “medidas” y calculadas. La tasa de sedimentación “medida”, realmente se trata de una aproximación a partir de los volúmenes de dragado en la zona.

Obsérvese que las mediciones del volumen de dragado se localizan en el tramo 5, el cual comprende de la boya 33 a 66, y oscilan entre 4.043 m<sup>3</sup>/mes y 157.943 m<sup>3</sup>/mes, con un promedio de 87.649 m<sup>3</sup>/mes y una desviación estándar de 63.712 m<sup>3</sup>/mes (73% del promedio).

Por su lado, el modelo estima que en este tramo el volumen de sedimentos depositado es de 51.157 m<sup>3</sup>/mes. Suponiendo que el volumen dragado es equivalente al azolvado se tiene que el modelo subestima en 42% el volumen de azolvamiento medido, lo cual se considera bueno, ya que es menor a la desviación estándar de las mediciones.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-67

**Tabla 8. Comparación de la Tasa de Azolvamiento medida y calculada**

Tramo	ID	Long (m)	Mediciones		Cálculo		
			Localización	Volumen mensual (m3)	Ancho (m)	Tasa promedio de sedimentación (mm/m2/30 días)	Volumen mensual (m3)
1 (M-7)	B3	10850			120	3.6	4668
2(7-13)	B8A	8300			120	34.6	34480
3(13-17)	B17	12450			120	33.7	50361
4(17-33)	B27	15300			120	8.7	16053
5(33-66)	B48	30500	promedio	87649	120	14.0	51157
			37 a 45	65561			
			44 a 45*	145294			
			45 a 48*	157943			
			44 a 51	65402			
			54 a 62	4043			
6(66-80)	B67	14000			120	8.6	14418

\* Promedio de varios dragados

Elaborado por: Grupo de trabajo

En resumen, dado que las mediciones de concentración de sólidos en suspensión en el Estero Salado se mantienen por debajo de los  $0,5 \text{ kg/m}^3$  y se calcula en el tramo 5 una tasa de azolvamiento dentro del rango de las mediciones, se concluye que el modelo reproduce correctamente el transporte de sedimentos cohesivos.

## 16.7. Escenarios de cálculo

Se simularon cuatro escenarios de dragado del canal de navegación: 9,60, 10,0, 10,5 y 11,0 m respecto al MLWS. Cada escenario se simuló utilizando las mismas especificaciones de la calibración del modelo: dominios de cálculo espacial y temporal (30 días), condiciones iniciales y de frontera, parámetros hidráulicos y sedimentos.

### 16.7.1. Caso base

Corresponde a las condiciones actuales del sistema, mismas que fueron modeladas y explicadas en el inciso anterior: Calibración del modelo.

#### 16.7.1.1. Análisis del prisma de marea

Con el propósito de analizar el prisma de marea y efectuar un balance de sedimentos se definieron tres secciones de control: EHS01, EHS05 y Enfilada, ver Figura 58. Estas tres secciones delimitan un volumen de control con un área en planta de  $211,75 \times 10^6 \text{ m}^2$ .

En la Figura 59 se muestra el gasto calculado en las secciones de control definidas anteriormente, durante los 30 días de la simulación (del 27 de diciembre de 2011 a las 0h00 al 26 de enero de 2012 a las 0h00). El signo del gasto es importante porque define la dirección del flujo. En la sección EHS01, el signo positivo indica que el flujo viene del Golfo de Guayaquil y entra al Volumen de control. En la sección EHS05, el signo positivo indica que el flujo viene del Volumen de control y se dirige hacia el Río

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-68



Guayas. En la sección Enfilada, el signo positivo indica que el flujo viene del Volumen de control y se dirige hacia el interior del Estero Salado.

Obsérvese que el orden de magnitud de los gastos en las tres secciones es diferente. El mayor se presenta en la sección EHS01 y el menor en la sección EHS05. Además, nótese que la magnitud del gasto varía conforme a la fase de la marea.

En la Figura 60 se muestra el volumen de agua acumulado que pasa por cada sección. El prisma de marea puede estimarse a partir de esta información, calculando la diferencia que existe entre un pico y un valle consecutivos. Obsérvese que el prisma de marea que pasa por las tres secciones es diferente. El mayor se presenta en la sección EHS01 y el menor en la sección EHS05. Además, nótese que, como era de esperarse, el prisma de marea varía conforme a la fase de la marea.

En la Figura 61 se muestra el volumen de agua acumulado que pasa por cada sección durante un día en particular; el mismo que se ha venido utilizando para analizar el comportamiento del sistema durante el flujo y reflujo (12 enero 2012). Durante este día, el prisma de marea vespertino en la sección EHS01 es de  $1,332 \times 10^9 \text{ m}^3$ , mientras que en las secciones EHS05 y Enfilada es de  $0,240 \times 10^9 \text{ m}^3$  y  $0,617 \times 10^9 \text{ m}^3$ , respectivamente. Esto quiere decir que al volumen de control entran  $0,475 \times 10^9 \text{ m}^3$  más de lo que salen por las secciones EHS05 y Enfilada juntas; los cuales, por el principio de la conservación de masa, se acumulan dentro del volumen de control. Si se divide este volumen entre el área en planta del volumen de control es posible calcular el incremento en el nivel de la superficie libre del agua, el cual resulta de 2,2 m. Comparando con la amplitud de la marea medida ese día en Posorja (2,5 m) y Enfilada (2,6 m) resulta que el cálculo tiene un error del 12%.

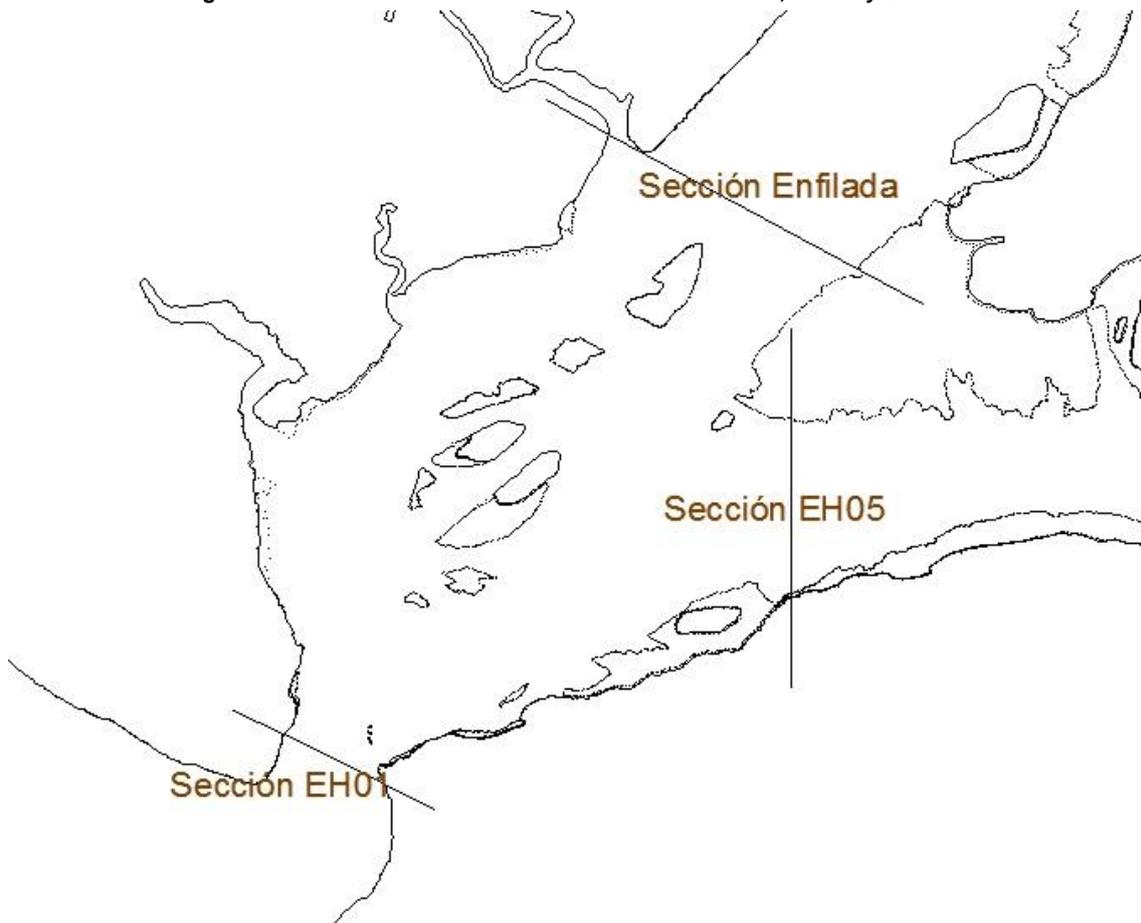
Es importante notar que el prisma de marea que entra al Estero Salado está definido por el volumen que pasa por la sección Enfilada y no por la sección EHS01; ya que no todo el volumen de agua que entra por esta sección (EHS01) pasa al Estero Salado, sino que una parte se dirige hacia el Río Guayas (sección EHS05). Por lo que, para la tarde del día 12 de enero de 2012, el prisma de marea que entra al Estero Salado fue de  $617 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

En la Figura 62 se muestra el volumen acumulado de sedimentos en suspensión que pasa por cada sección. Nótese que, salvo al inicio de la simulación, el transporte de sedimentos en las tres secciones es hacia afuera del volumen de control (en las secciones EHS05 y Enfilada es positivo, mientras que en la sección EHS01 el transporte es negativo). Lo cual significa que en términos generales el fondo del volumen de control se erosiona constantemente y se constituye como la principal fuente de sedimentos en suspensión.

Finalmente, obsérvese que según esta simulación, fueron transportados más de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sedimentos en suspensión, durante el mes de enero de 2012, desde la zona del volumen de control hacia el interior del Estero Salado; los cuales se depositaron en diferentes zonas del mismo.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-69

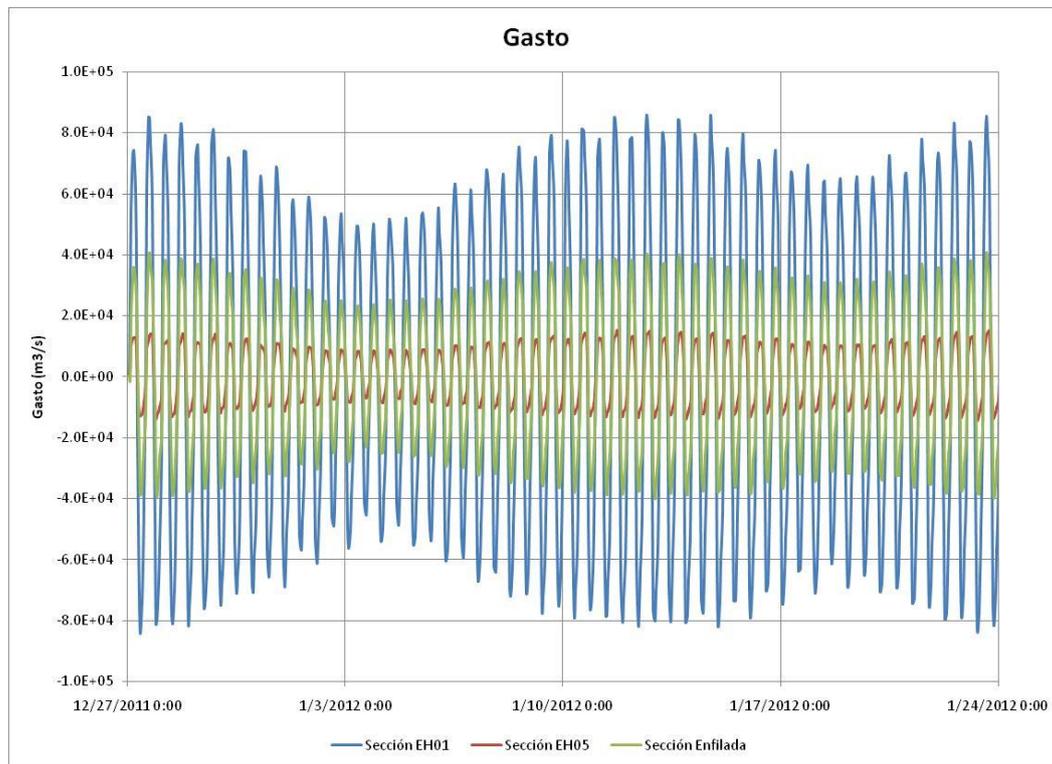
Figura 58. Localización de las secciones de control EHS01, EHS05 y Enfilada.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

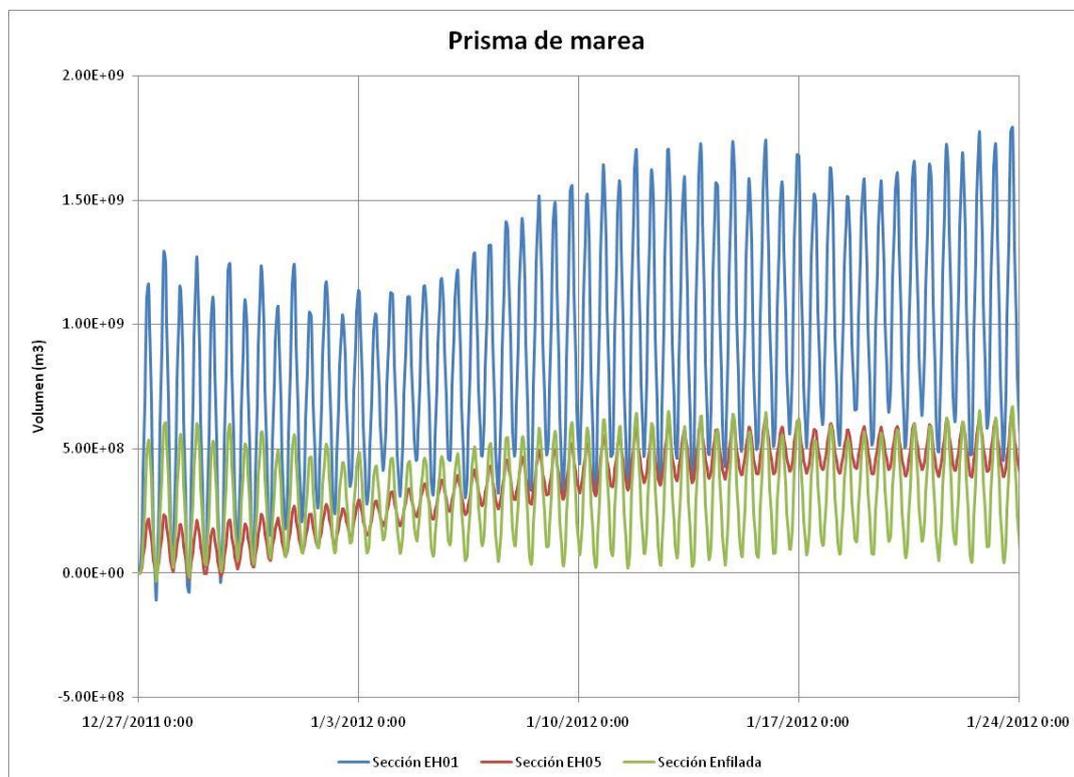
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-70

**Figura 59. Gasto que pasa por las secciones EHS01, EHS05 y Enfilada a lo largo de toda la simulación, del 27 de diciembre de 2011 a las 0h00 al 26 de enero de 2012 a las 0h00.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

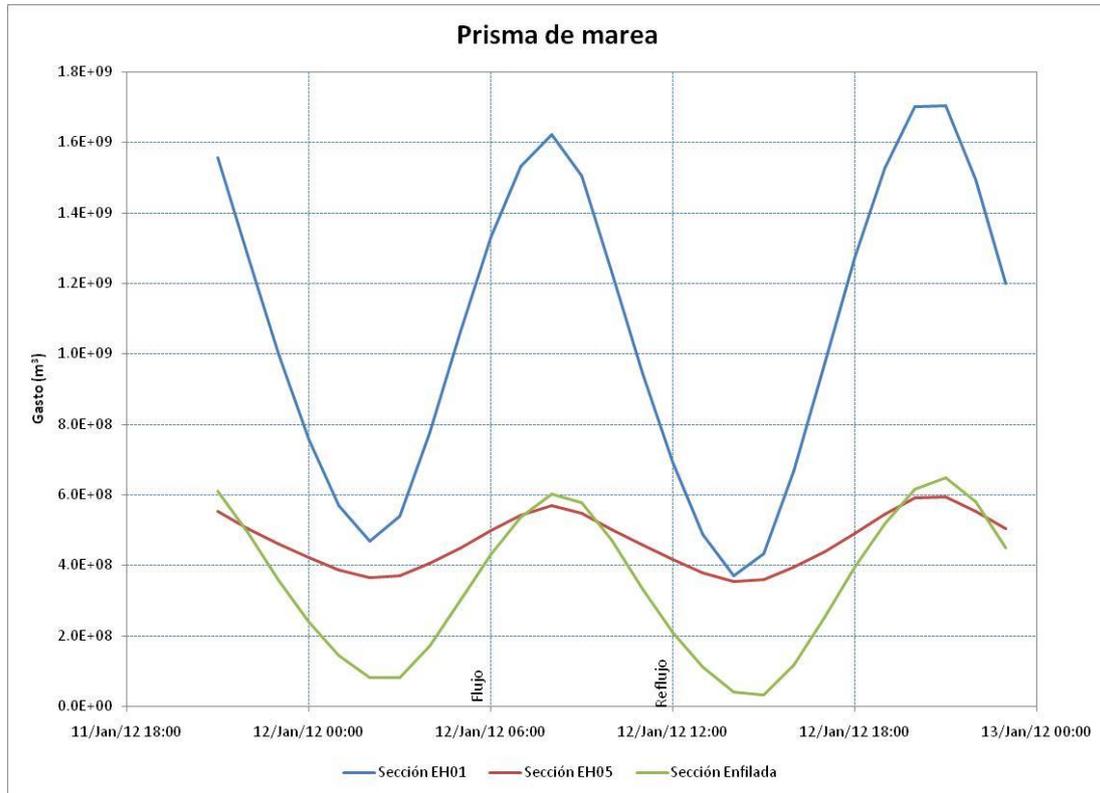
**Figura 60. Prisma de marea por las secciones EHS01, EHS05 y Enfilada a lo largo de toda la simulación, del 27 de diciembre de 2011 a las 0h00 al 26 de enero de 2012 a las 0h00.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

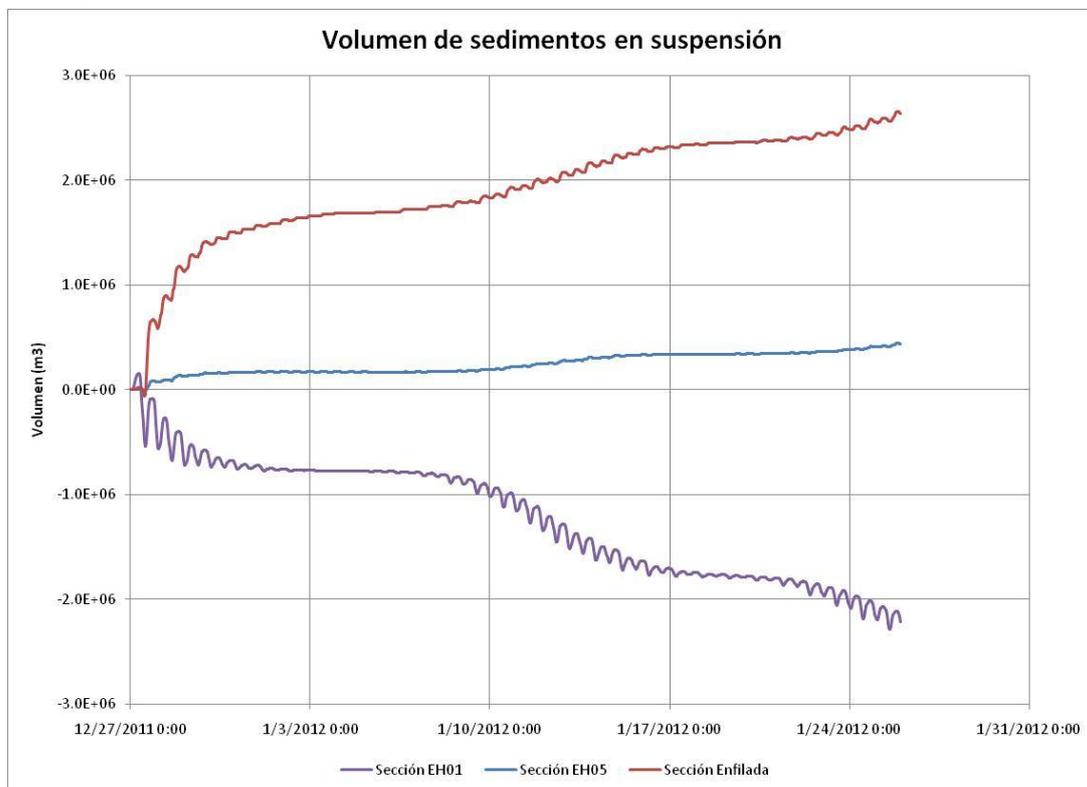
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-71

Figura 61. Prisma de marea por las secciones EHS01, EHS05 y Enfilada, durante el día 12 de enero de 2012.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Figura 62. Volumen de sedimentos en suspensión transportados por las secciones EHS01, EHS05 y Enfilada a lo largo de toda la simulación, del 27 de diciembre de 2011 a las 0h00 al 26 de enero de 2012 a las 0h00.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-72

## 16.7.2. Canal de navegación dragado

Para el análisis de los escenarios se divide el canal de navegación en seis tramos (ver Tabla 9): de la boya mar a la boya 7; de la boya 7 a la 13; de la boya 13 a la 17; de la boya 17 a la 33; de la boya 33 a la 66; y de la boya 66 a la 80. Cada tramo es representado por una boya.

Se simulan los siguientes casos: canal de navegación en condiciones actuales (caso base), y canal de navegación dragado a diferentes cotas: -9,6m, -10,0m, -10,5m, -11,0m. Todas las cotas están referidas al MLWS.

Para la simulación de cada escenario lo único que se modifica en el modelo es la batimetría del canal de navegación, de acuerdo con la geometría resultante del diseño del mismo.

Para el escenario denominado “buque de diseño”, se utilizó la geometría del diseño y la tasa de azolvamiento calculada con el canal de navegación dragado a la -11,0m.

Tabla 9. Definición de tramos en los que se divide el canal de navegación para su análisis.

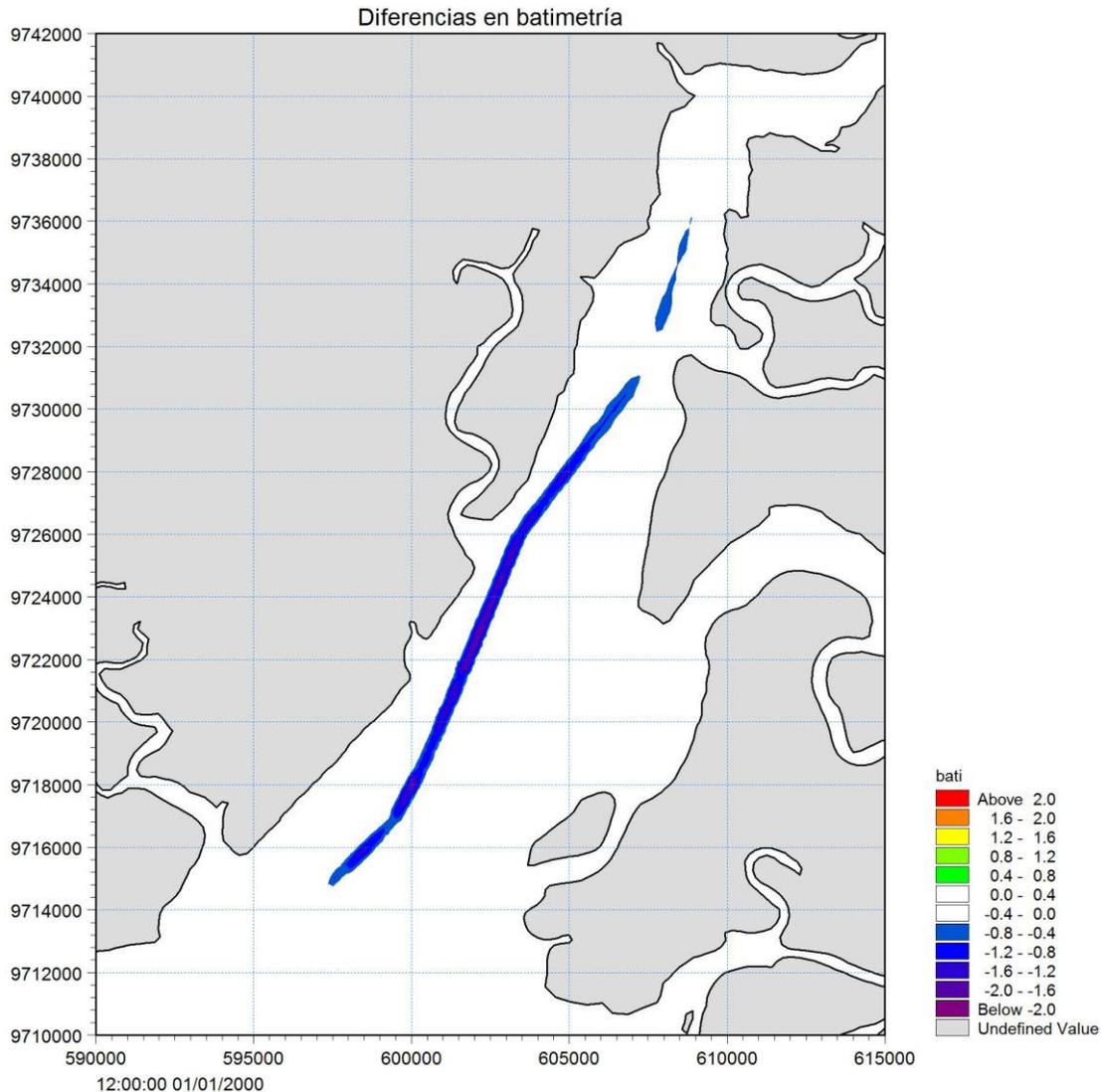
Estación representativa	Zona que representa	Longitud (km)
B3	Boya de mar (0+000 Km), a Boya 7 (10+850 Km)	10.850
B8A	Boya 7 (10 + 850 Km) a la Boya 13 (19 + 150 Km)	8.300
B17	Boya 13 (19 + 150 Km) a la Boya 17 (31 + 600 Km)	12.450
B27	Boya 17 (31 + 600 Km) a la Boya 33 (46 + 900 Km)	15.300
B48	Boya 33 (46 + 900 Km) a la Boya 66 (77 + 400 Km)	30.500
B67	Boya 66 (77 + 400 Km) a la Boya 80 (91 + 400 Km)	14.000

Elaborado por: Grupo de trabajo

### 16.7.2.1. Análisis de la batimetría

En la Figura 63 se muestra la diferencia de cotas entre la batimetría del caso del canal dragado a la cota -11,0m y el caso base (condiciones actuales). Nótese que las diferencias son menores a los 2 m y se concentran dentro del canal de navegación.

**Figura 63. Diferencia de cotas entre la batimetría del caso del canal dragado a la cota -11,0m y el caso base (condiciones actuales).**



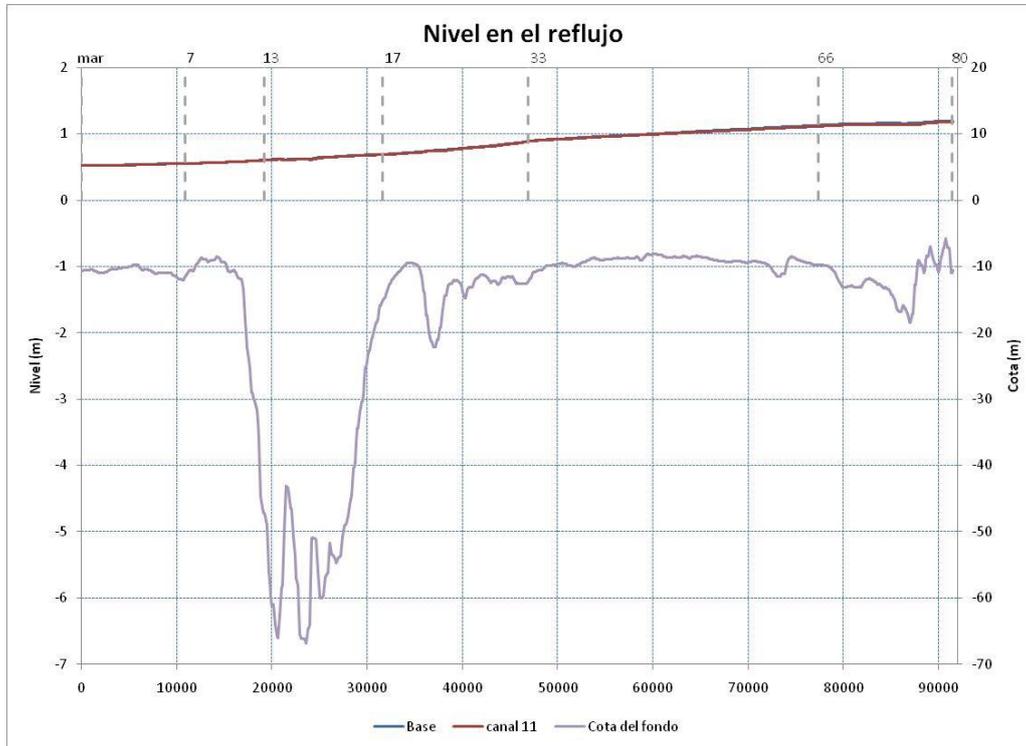
### 16.7.2.1. Análisis del nivel de la superficie libre del agua

En la Figura 64 se muestra el nivel de la superficie libre del agua durante el reflujo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para el caso base y el canal dragado a la cota -11,0 m. Nótese que: el nivel del agua al interior del estero (boya 80) es mayor al del mar (boya mar); las diferencias entre ambos escenarios son mínimas.

En la Figura 65 se muestran las diferencias de nivel entre ambos casos a lo largo del canal de navegación. Obsérvese que el dragado del canal provoca que los niveles disminuyan en la parte interna del estuario (valores negativos), hasta en -0,02 m (1%). En la Figura 66 se muestra un mapa 2D con las diferencias. Obsérvese que las diferencias dentro del canal son similares a las que se presentan a lo ancho del Estero Salado.

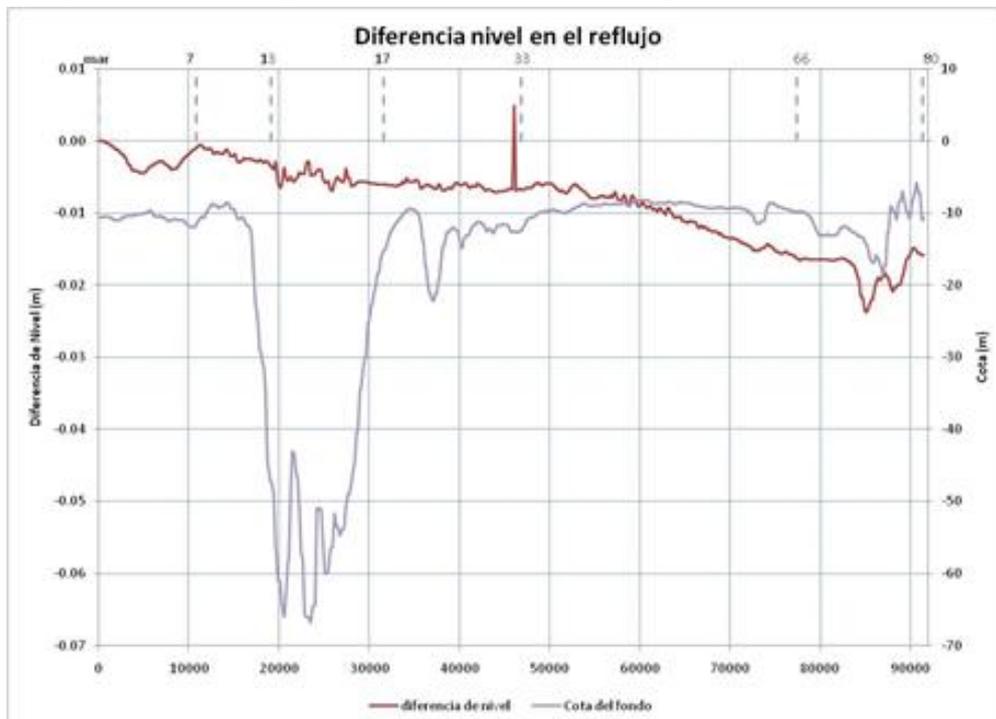
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultoría	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-74

Figura 64. Nivel de la superficie libre del agua durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para el caso base y la cota de dragado: 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

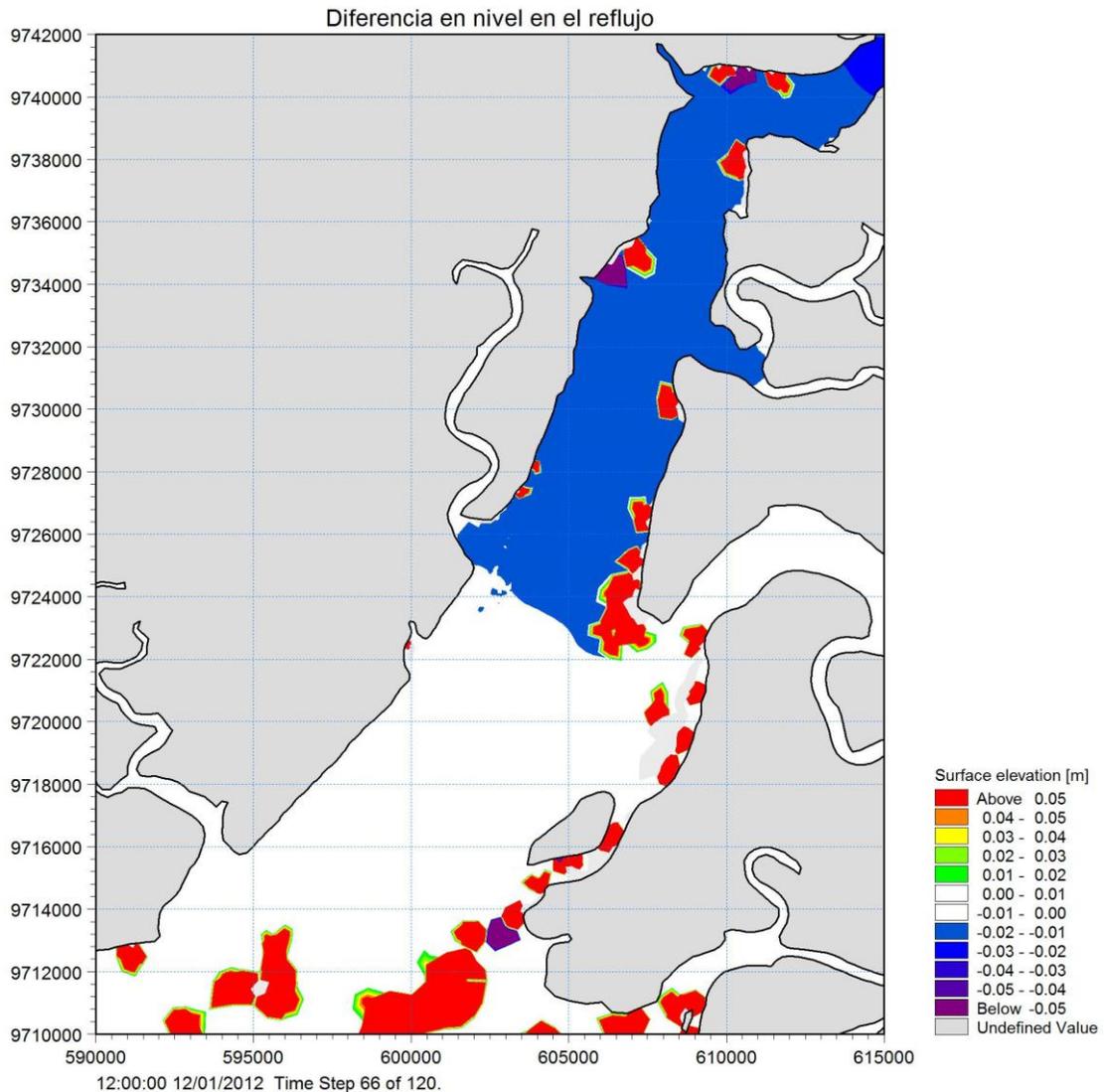
Figura 65. Diferencia de nivel de la superficie libre del agua durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación entre el caso que considera un dragado a la cota -11,0 m y el caso base (condiciones actuales). Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-75

**Figura 66. Diferencia de nivel de la superficie libre del agua durante el reflujó (12 enero 2012 a las 12:00) entre el caso que considera un dragado a la cota -11,0 m y el caso base (condiciones actuales).**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

### 16.7.2.1. Análisis de la velocidad de la corriente

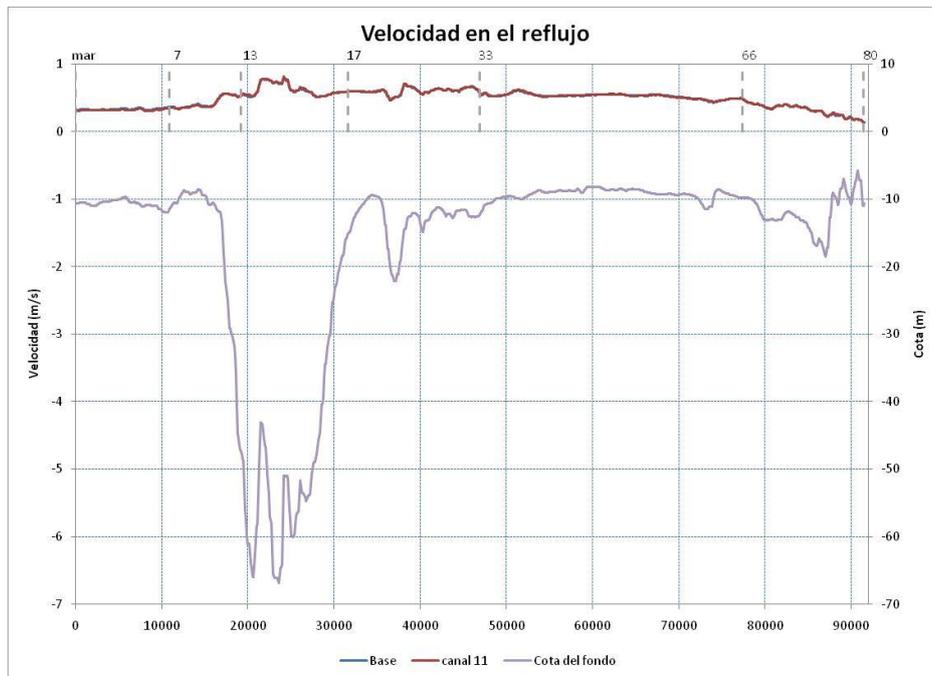
En la Figura 67 se muestra la velocidad de la corriente durante el reflujó (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para el caso base y el canal dragado a la cota -11,0 m. Nótese que: las velocidades son menores a 1 m/s a lo largo de todo el canal; las diferencias entre ambos escenarios son mínimas.

En la Figura 68 se muestran las diferencias de velocidad entre ambos casos. Obsérvese que el dragado del canal provoca que las velocidades disminuyan ligeramente (1%) entre la boya 44 y 66. En la Figura 69 se muestra un mapa 2D con las diferencias de velocidad. Nótese que el dragado del canal de navegación incrementa ligeramente la velocidad de la corriente dentro de éste, antes de la boya 44, mientras que la disminuye sobre el eje del canal y fuera de éste, entre las boyas 44 a 66.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-76

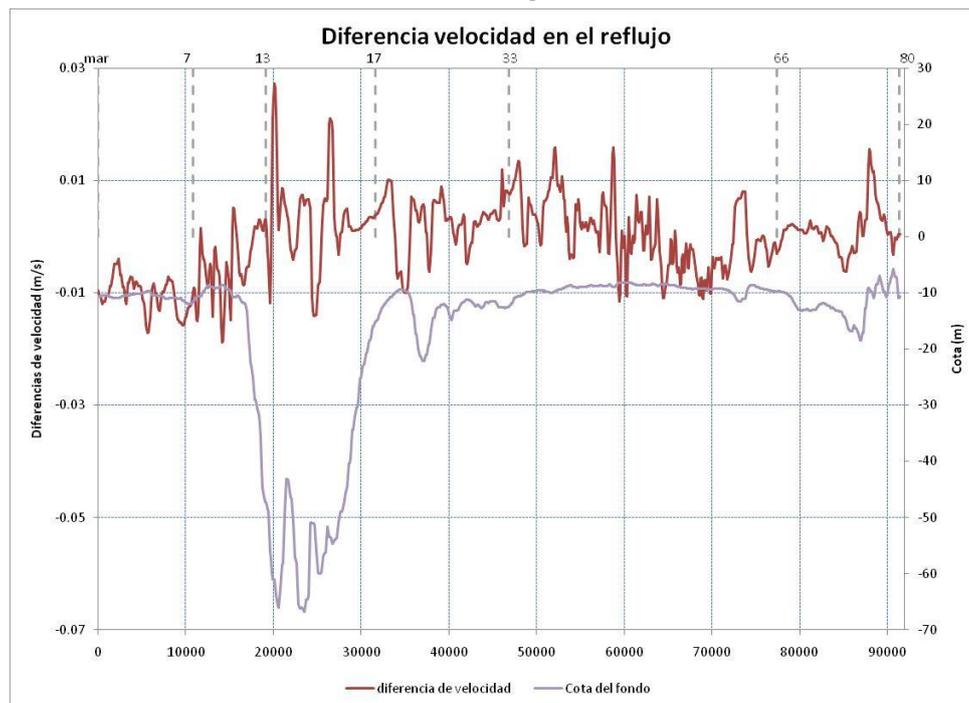
Por lo anterior, se concluye que el dragado en sus diferentes escenarios (hasta 11,0 m), afecta en menos del 3% la hidrodinámica del Estero Salado, por lo que se considera un efecto mínimo.

**Figura 67. Velocidad de la corriente durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para el caso base y la cota de dragado: 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

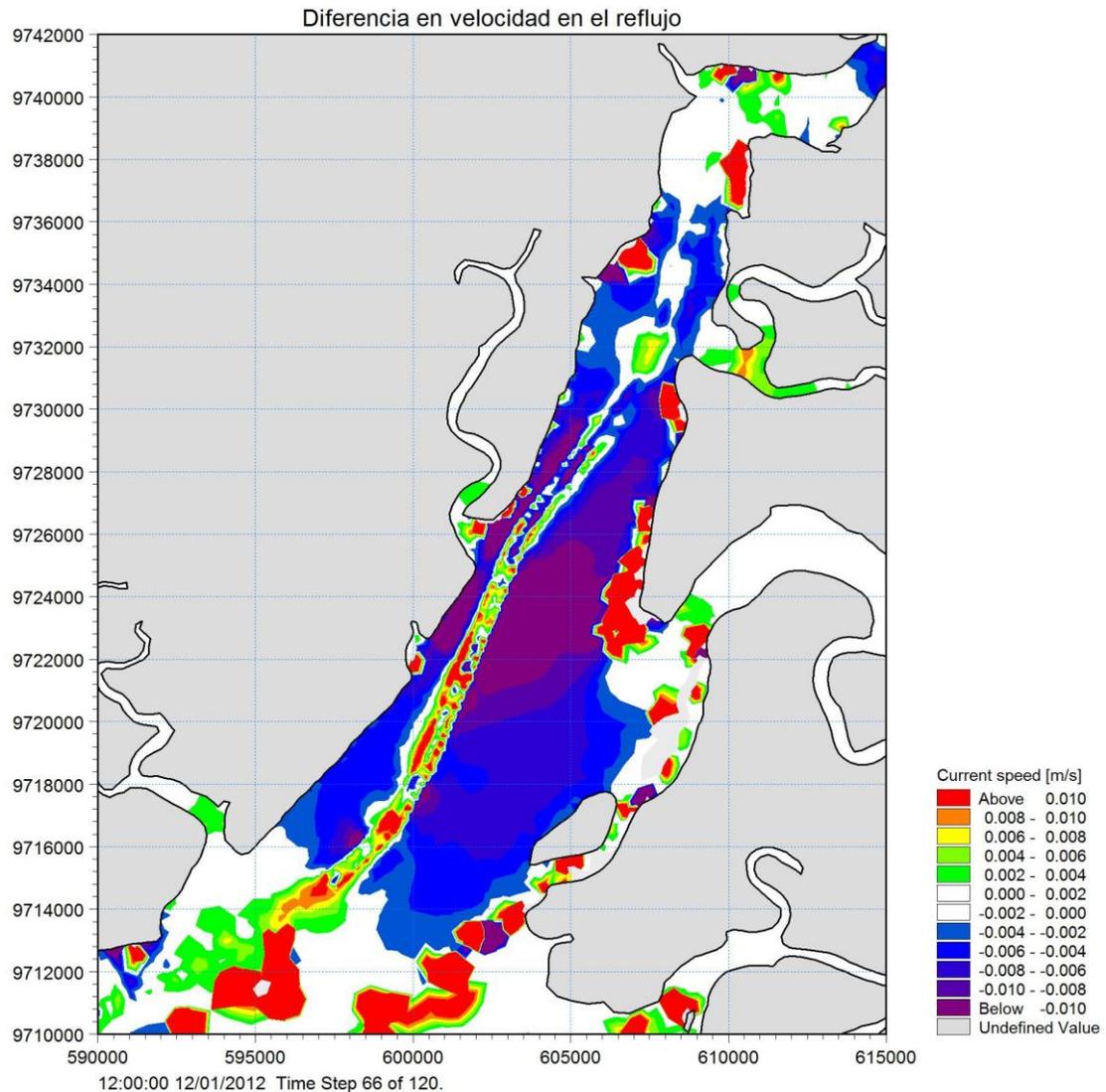
**Figura 68. Diferencia de velocidad durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación entre el caso que considera un dragado a la cota -11,0 m y el caso base (condiciones actuales). Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultoría	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-77

**Figura 69. Diferencia de velocidad durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) entre el caso que considera un dragado a la cota -11,0 m y el caso base (condiciones actuales).**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

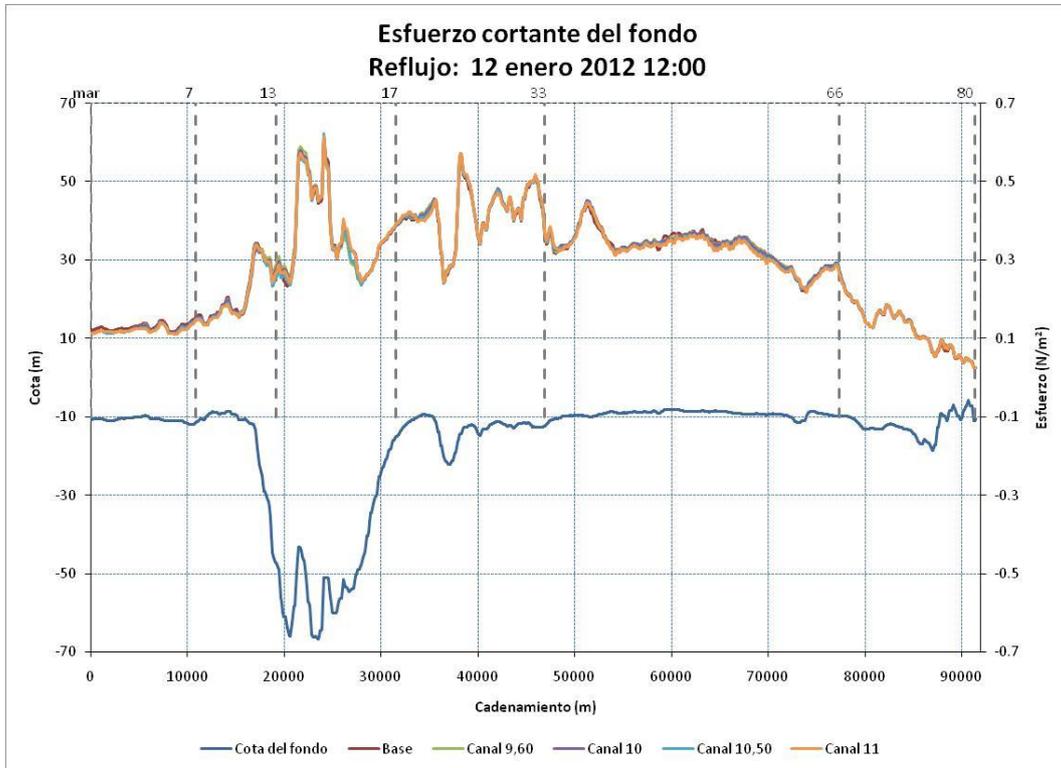
### 16.7.2.1. Análisis del esfuerzo cortante que ejerce el flujo en el fondo

En la Figura 70 se muestra el esfuerzo cortante de fondo durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para los diferentes escenarios. Nótese que el esfuerzo cortante de fondo es menor a  $0,6 \text{ N/m}^2$  y que el dragado afecta poco esta variable.

En la Figura 71 se muestra la diferencia el esfuerzo cortante de fondo a lo largo del canal de navegación, a esta hora, entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base. Obsérvese que las diferencias son menores a  $\pm 0,03 \text{ N/m}^2$  (5%). En la Figura 72 se muestra un mapa 2D de esta diferencia. Obsérvese que el dragado del canal disminuye el esfuerzo entre las boyas 44 y 66 (tanto dentro del canal como fuera de éste), mientras que lo incrementa en algunas otras zonas dentro del mismo.

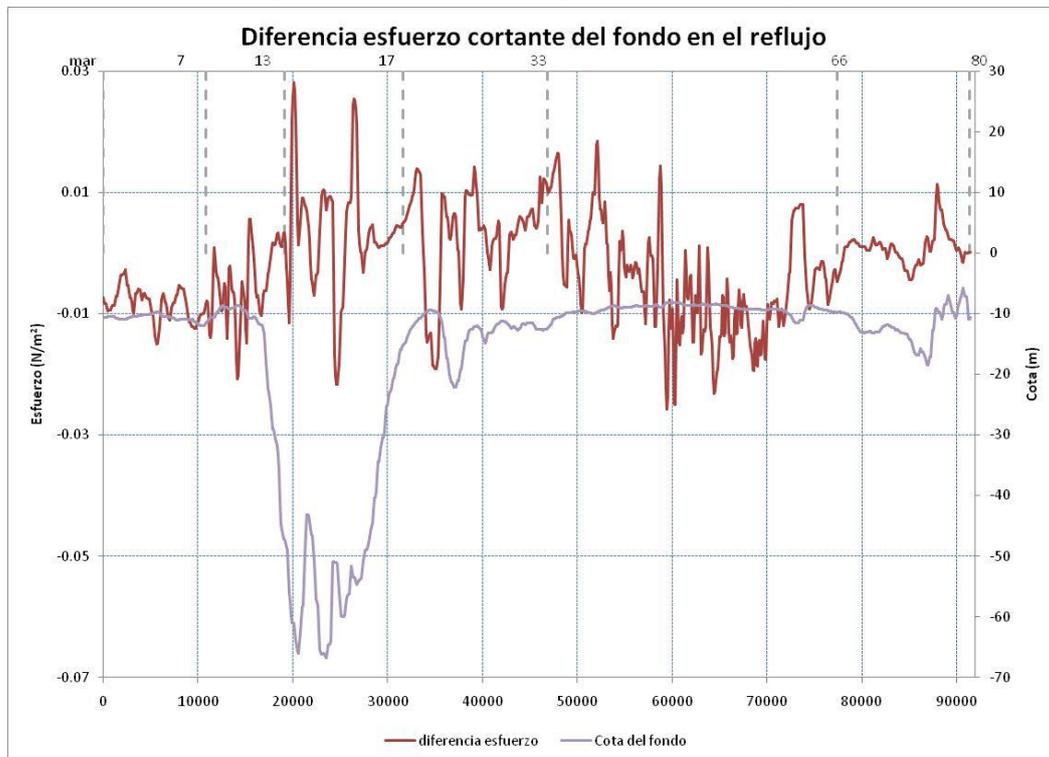
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-78

Figura 70. Esfuerzo cortante de fondo durante el reflujó (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegaci3n para diferentes cotas de dragado: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m. Para referencia se muestra la configuraci3n del fondo del canal.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

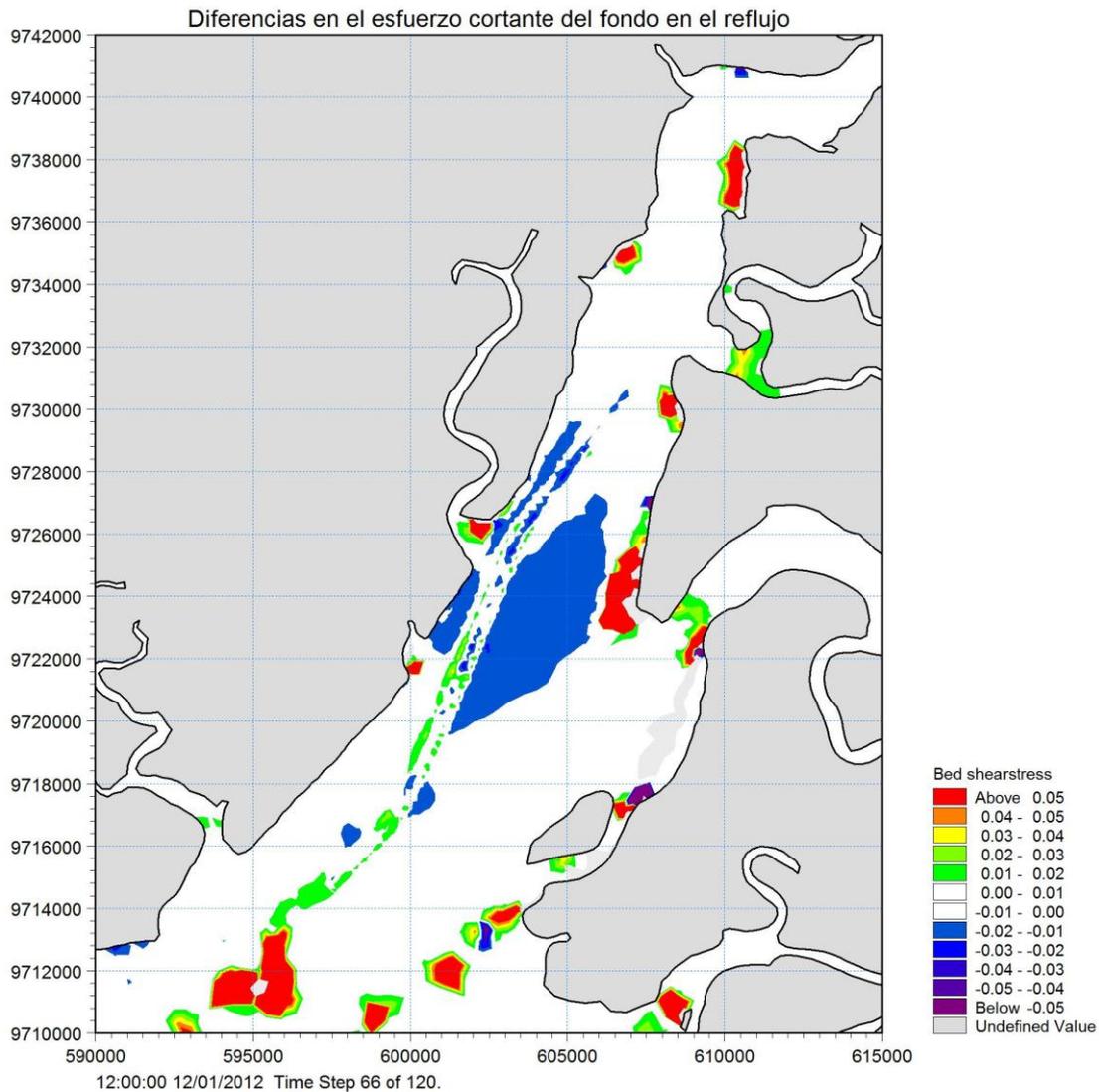
Figura 71. Diferencia del esfuerzo cortante de fondo durante el reflujó (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegaci3n, entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Dise1o para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisi3n: 1	P1gina
Asociaci3n Geoestudios – Consultsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-79

**Figura 72. Diferencia (mapa 2D) del esfuerzo cortante de fondo durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base.**



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

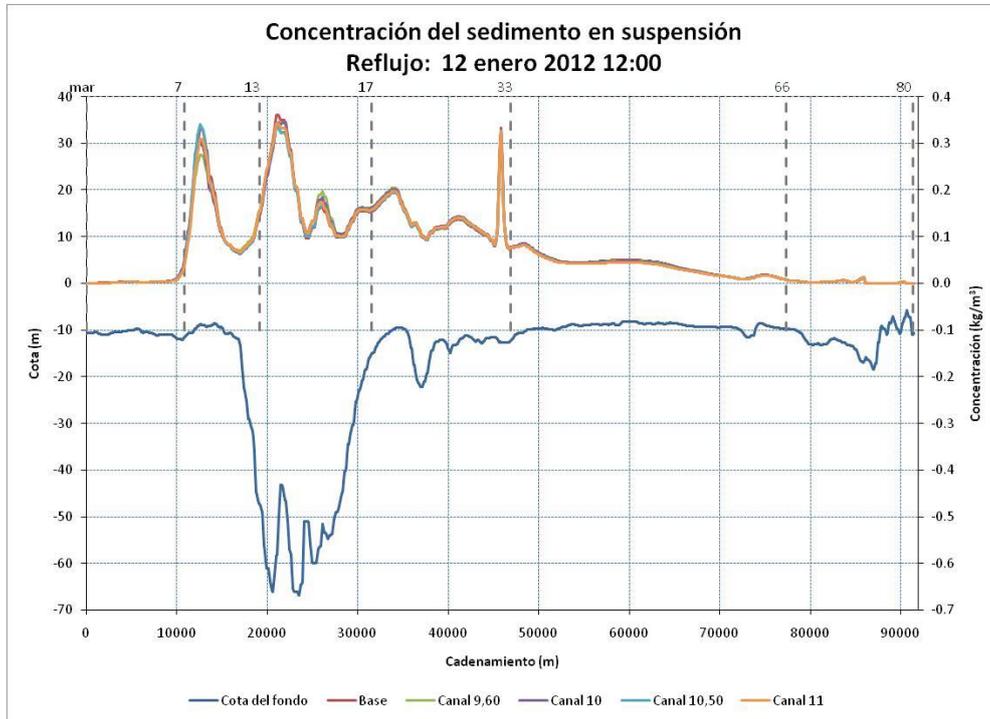
### 16.7.2.1. Análisis de la concentración de sólidos en suspensión

En la Figura 73 se muestra la concentración de sólidos en suspensión durante el refluo (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para los diferentes escenarios. Nótese que las concentraciones son menores a  $0,4 \text{ kg/m}^3$  y que nuevamente que el dragado afecta poco esta variable.

En la Figura 74 se muestra la diferencia de la concentración de sólidos en suspensión a la misma hora, a lo largo del canal de navegación, entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base. Obsérvese que: las diferencias son menores a  $0,01 \text{ kg/m}^3$ , lo cual representa menos del 2,5%; entre las boyas 33 a 66 el dragado induce concentraciones menores.

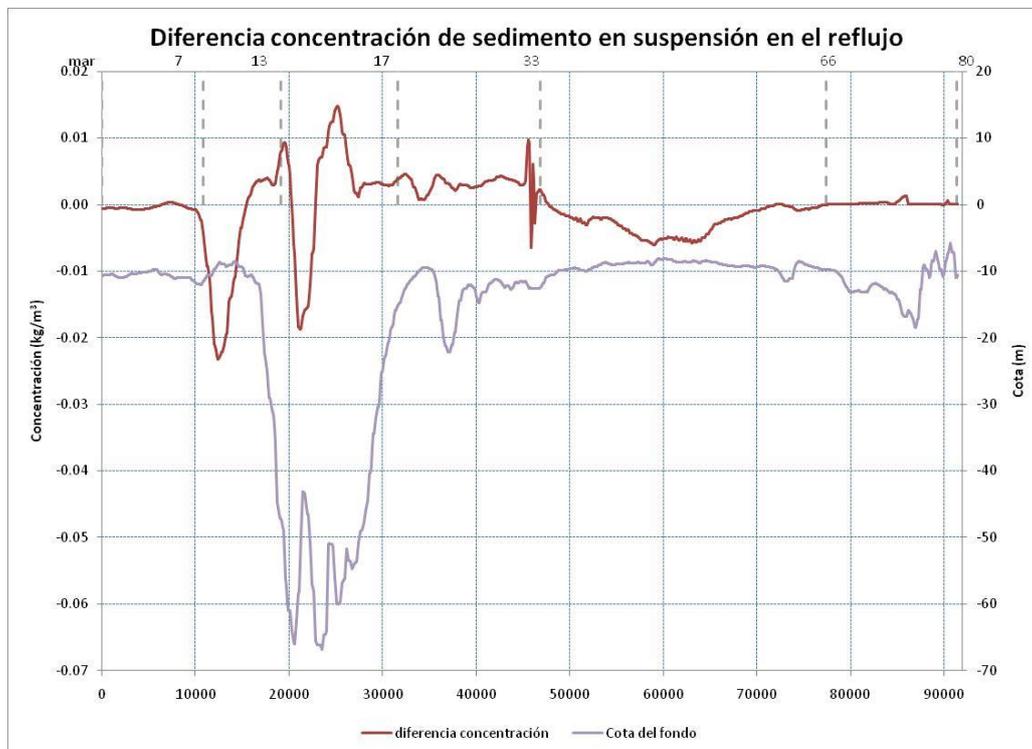
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-80

Figura 73. Concentración de sólidos en suspensión durante el reflujó (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación para diferentes cotas de dragado: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

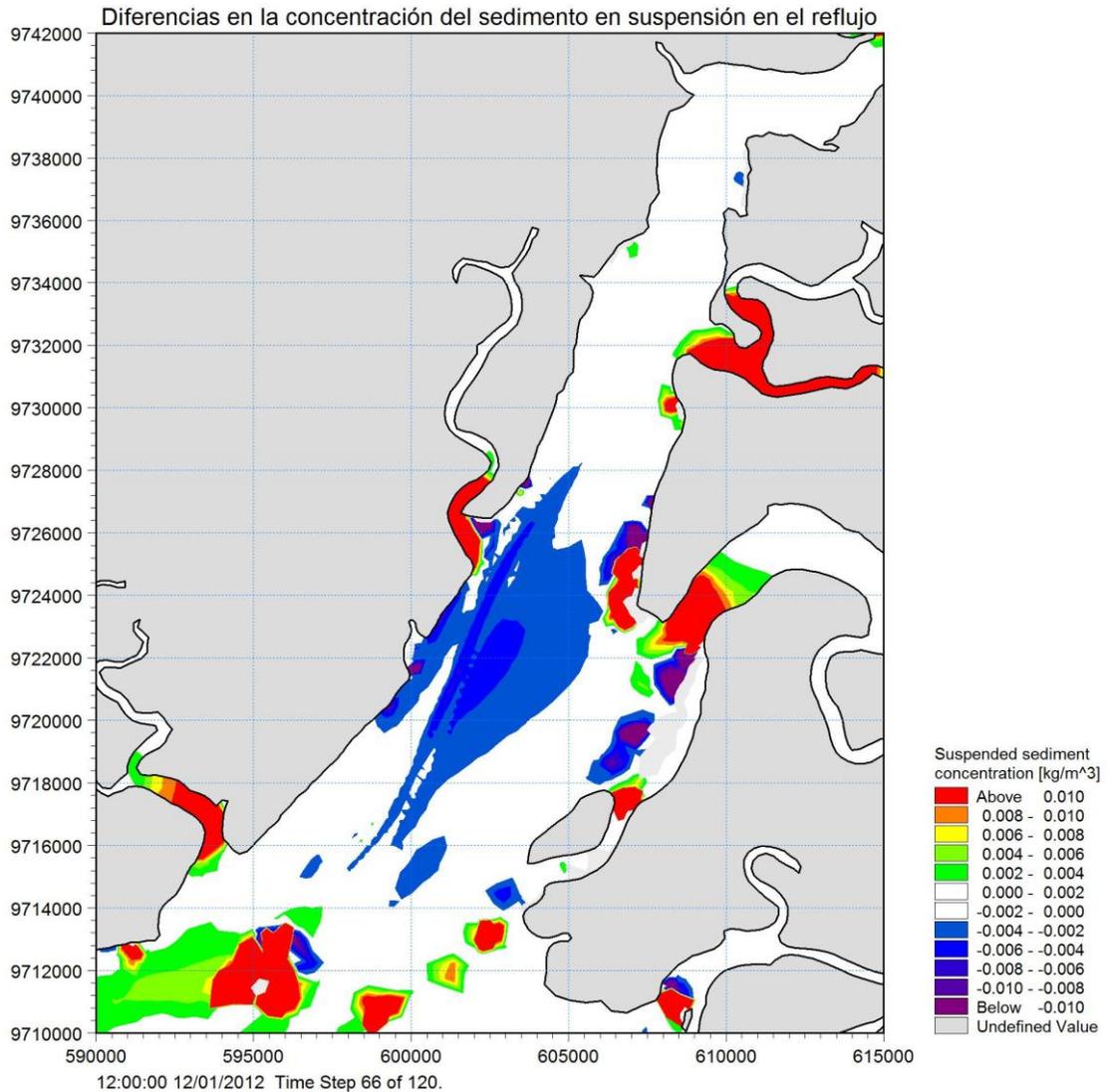
Figura 74. Diferencia en la concentración de sólidos en suspensión durante el reflujó (12 enero 2012 a las 12:00) a lo largo del canal de navegación, entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-81

**Figura 75. Diferencia (mapa 2D) de concentración de sólidos en suspensión durante el reflujo (12 enero 2012 a las 12:00), entre el caso del dragado a la cota -11,0 m y el caso base.**



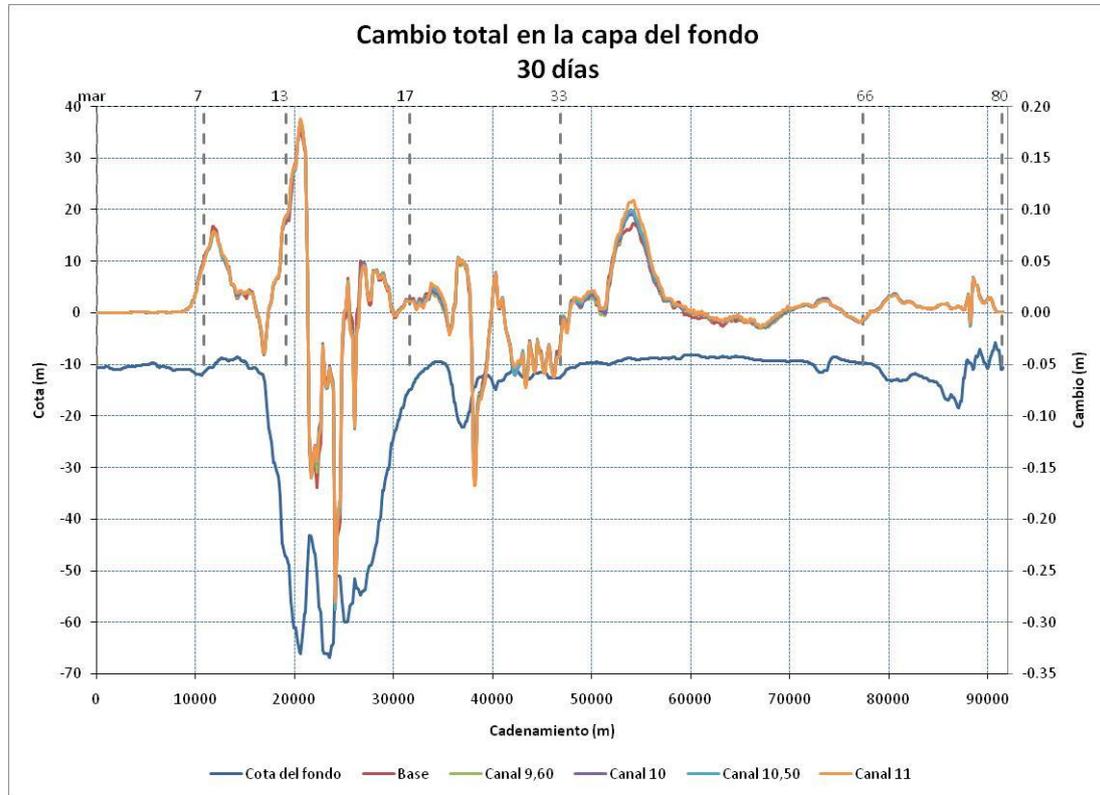
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

### 16.7.2.1. Análisis del cambio total en el espesor de la capa de fondo

En la Figura 76 se muestra el cambio total en el espesor de la capa de fondo, a lo largo del canal de navegación, a los 30 días de simulación, para los diferentes escenarios. Nótese nuevamente que el dragado afecta poco esta variable.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consultsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-82

Figura 76. Cambio total en el espesor de la capa de fondo, a los 30 días de simulación, a lo largo del canal de navegación para diferentes cotas de dragado: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m. Para referencia se muestra la configuración del fondo del canal.

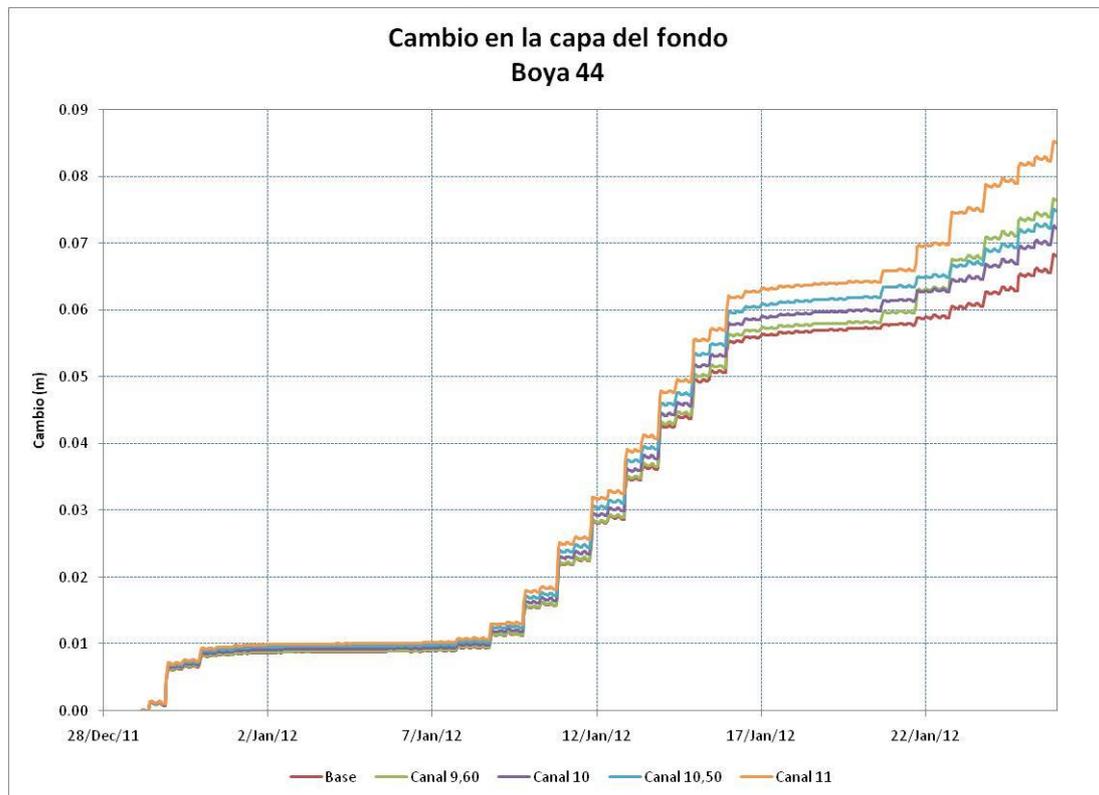


Fuente: Grupo de Trabajo 2012

A fin de observar mejor el efecto del dragado en el proceso de azolvamiento del canal de navegación, en la Figura 77 se muestra el cambio total en el espesor de la capa de fondo en la boya 44 para diferentes cotas de dragado del canal de navegación: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m. Nótese que las diferencias son mínimas, pero éstas se acrecientan en la medida que se profundiza el canal.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-83

Figura 77. Cambio total en el espesor de la capa de fondo en la boya 44 para diferentes cotas de dragado del canal de navegación: 9,60, 10,0, 10,50 y 11,0 m.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

### 16.7.2.2. Análisis del volumen de azolvamiento por tramo

En la Tabla 10 se muestra la tasa promedio de sedimentación y la estimación del volumen anual de azolvamiento en cada uno de los tramos que se dividió el canal, para los escenarios de dragado.

Para el cálculo de la tasa promedio de sedimentación se extrajeron puntos aproximadamente a cada 100 m de distancia a lo largo del eje del canal de navegación, se agruparon por tramo, se seleccionaron los que tuvieran a los 30 días un cambio total en la capa de fondo positivo, se sumó el cambio total en la capa de fondo y dividió entre la longitud del tramo.

Para la estimación del volumen anual de azolvamiento por tramo se extrapoló la tasa promedio de sedimentación de 30 días a un año y se multiplicó por la longitud y el ancho del canal de navegación en cada tramo.

Obsérvese en primer lugar que la tasa promedio de sedimentación no se comporta de manera lineal entre los diferentes escenarios. Por ejemplo, la tasa promedio de sedimentación en el tramo B3 en el caso base es de 3,6 mm/m<sup>2</sup>/30días, cuando el canal de navegación se draga a -9,60 m respecto al MLWS la tasa disminuye a 3,5 mm/m<sup>2</sup>/30días (ver Tabla 10), luego aumenta ligeramente cuando el canal se draga a 10,0 y 10,5 m, para luego disminuir a 3,4 mm/m<sup>2</sup>/30días cuando el dragado es a la cota -11,0 m respecto al MLWS.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-84



En el tramo B48 el comportamiento es más uniforme, la tasa promedio de sedimentación se incrementa conforme más se draga el canal: en el caso base la tasa es de 14,0 mm/m<sup>2</sup>/30días, cuando el canal de navegación se draga a -9,60 m la tasa aumenta a 14,6 mm/m<sup>2</sup>/30días (ver Tabla 10), cuando el dragado es a -10,0 m la tasa aumenta a 14,7 mm/m<sup>2</sup>/30días, para -10,5 m la tasa aumenta a 15,5 mm/m<sup>2</sup>/30días y, finalmente, para 11,0 m la tasa aumenta a 16,8 mm/m<sup>2</sup>/30días.

Por lo anterior, el volumen anual de azolvamiento puede comportarse de la misma manera, aunque como el ancho del canal aumenta entre mayor es la profundidad de dragado, este efecto tiende a anularse y en general se tienen mayores volúmenes de sedimentación entre mayor sea el dragado.

Nótese en segundo lugar que para un dragado a la cota -9,60 m, el tramo con mayor sedimentación es el B17 (35,1 mm/m<sup>2</sup>/30días), lo cual no es relevante porque en este tramo se tienen las profundidades más grandes. Le siguen los tramos B8A y B48 con una tasa promedio de sedimentación de 33,8 y 14,6 mm/m<sup>2</sup>/30días, respectivamente (ver Tabla 10 y Figura 76). Obsérvese que la tasa promedio de sedimentación en el tramo B48 es menor porque su longitud es mayor, pero el cambio total en la capa de fondo entre los abscisa 50+000 y 60+000 es mayor que en el tramo B8A.

Atendiendo sólo el tramo B48, obsérvese que el volumen de sedimentación para un dragado del canal de navegación a la cota -9,6 m es de 0,651 millones de m<sup>3</sup> anuales, de 0,795 millones de m<sup>3</sup> anuales si el canal se draga a la cota -10,0 m, de 0,861 millones de m<sup>3</sup> anuales si el canal se draga a la cota -10,5 m, de 0,955 millones de m<sup>3</sup> anuales si el canal se draga a la cota -11,0 m, y de 1,224 millones de m<sup>3</sup> anuales si el canal se draga para el buque de diseño.

Nótese que el escenario “buque de diseño” incrementa sensiblemente el volumen de azolvamiento: en el tramo B3 se incrementa en 30% respecto al canal dragado a la cota -11,0m (74% respecto al caso base); en el tramo B17 se incrementa en 27% respecto al canal dragado a la cota -11,0m (95% respecto al caso base); en el tramo B48 se incrementa en 28% respecto al canal dragado a la cota -11,0m (97% respecto al caso base).

Por lo anterior, se concluye que en caso de dragar el canal por debajo de la cota -9,6 m respecto al MLWS, el volumen de dragado de mantenimiento se incrementará, no sólo porque se incrementa la zona de dragado (ancho del canal), sino porque se incrementa también la tasa de sedimentación. Esta tabla se encuentra en el Anexo A.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-85



Tabla 10. Tasa promedio de sedimentación (mm/m<sup>2</sup>/30días) y estimación del volumen anual de azolvamiento (1E6 m<sup>3</sup>) en cada uno de los tramos que se dividió el canal, para los diferentes escenarios de dragado.

Tramo	Long (m)	9,60 m		10		10,5		11,0 m		11,0 m Buque de diseño						
		Ancho (m)	Tasa promedio de sedimentación (mm/m <sup>2</sup> /30 días)	Volumen anual (1E6m <sup>3</sup> )	Ancho (m)	Tasa promedio de sedimentación (mm/m <sup>2</sup> /30 días)	Volumen anual (1E6m <sup>3</sup> )	Ancho (m)	Tasa promedio de sedimentación (mm/m <sup>2</sup> /30 días)	Volumen anual (1E6m <sup>3</sup> )	Ancho (m)	Tasa promedio de sedimentación (mm/m <sup>2</sup> /30 días)	Volumen anual (1E6m <sup>3</sup> )			
B3	10850	120	2,9	0,0454	163	3,5	0,0763	167	3,5	0,0765	171	3,4	0,0761	222	3,4	0,0988
B8A	8300	120	27,8	0,3370	139	34,5	0,4843	141	34,4	0,4905	143	35,0	0,5060	171	35,0	0,6050
B17	12450	120	28,9	0,5244	174	34,9	0,9209	178	34,4	0,9274	181	34,5	0,9461	229	34,5	1,1970
B27	15300	120	7,2	0,1602	163	9,0	0,2732	167	9,2	0,2845	170	9,2	0,2923	212	9,2	0,3645
B48	30500	120	12,0	0,5350	146	14,7	0,7953	150	15,5	0,8618	153	16,8	0,9554	196	16,8	1,2239
B67	14000	120	7,1	0,1454	180	8,6	0,2640	184	8,5	0,2673	188	8,3	0,2670	239	8,3	0,3395
<b>TOTAL</b>	<b>91400</b>		<b>85,82</b>	<b>1,75</b>		<b>105,28</b>	<b>2,81</b>		<b>105,48</b>	<b>2,91</b>		<b>107,32</b>	<b>3,04</b>		<b>107,32</b>	<b>3,83</b>

Fuente: Grupo de Trabajo 2012

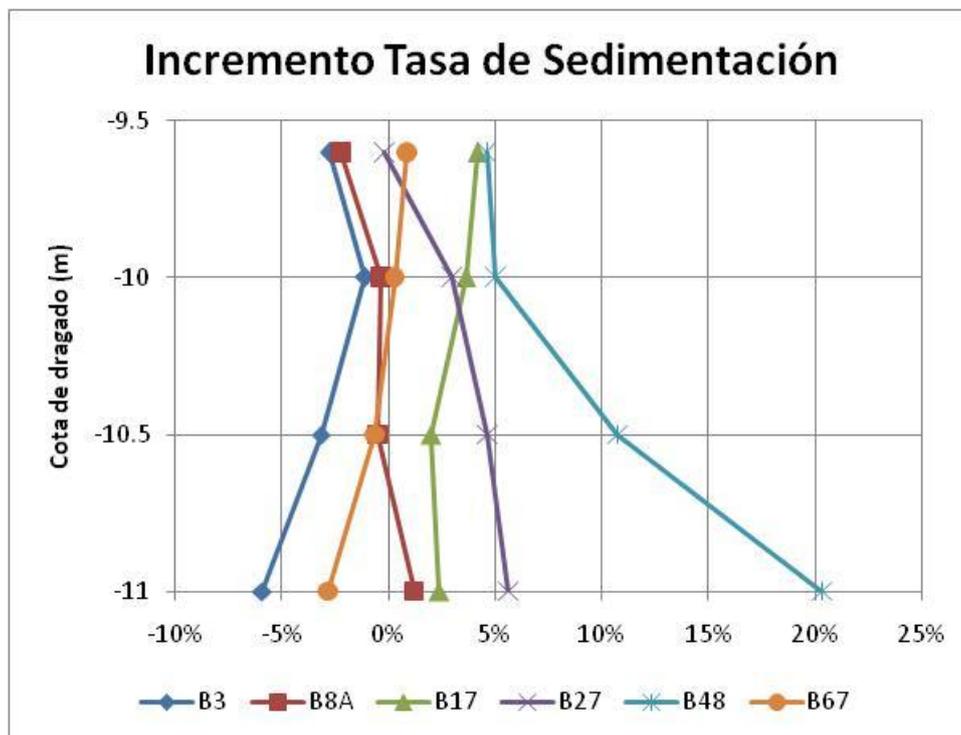
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-0

### 16.7.2.3. Análisis del comportamiento de cada tramo respecto a la cota de dragado.

En la Figura 78 se muestra el incremento en la tasa de sedimentación, respecto al caso base, para las diferentes cotas de dragado. Obsérvese en los tramos B3, B17 y B67 que entre más profundo se draga el canal de navegación la tasa de sedimentación disminuye respecto al caso base; mientras que en los tramos B8A, B27 y B48 sucede lo contrario, entre más profundo se draga el canal la tasa de sedimentación aumenta.

Por otro lado, nótese también que en todos los tramos, excepto en el B48, no importa a qué profundidad se drague el canal, los cambios respecto al caso base son menores al 5%. No obstante, en el tramo B48 el incremento en la tasa de sedimentación se duplica cada 0,50 m de dragado; esto es, si se draga el canal a la cota -10,0 m la tasa de sedimentación crece 5% respecto al caso base, pero si se draga a la cota -10,5 m ó -11,0 m, la tasa de sedimentación se incrementa a 10% y 20%, respectivamente, respecto al caso base.

Figura 78. Incremento de la tasa promedio de sedimentación (%) respecto al caso base, para los diferentes escenarios de dragado, en cada uno de los tramos que se dividió el canal.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

En la Figura 79 se muestra el incremento del volumen de azolvamiento anual, respecto al caso base, para los diferentes escenarios de dragado. Nótese en primer lugar, que este valor está influenciado tanto por el incremento en la tasa de sedimentación, como por el incremento del ancho de plantilla del canal.

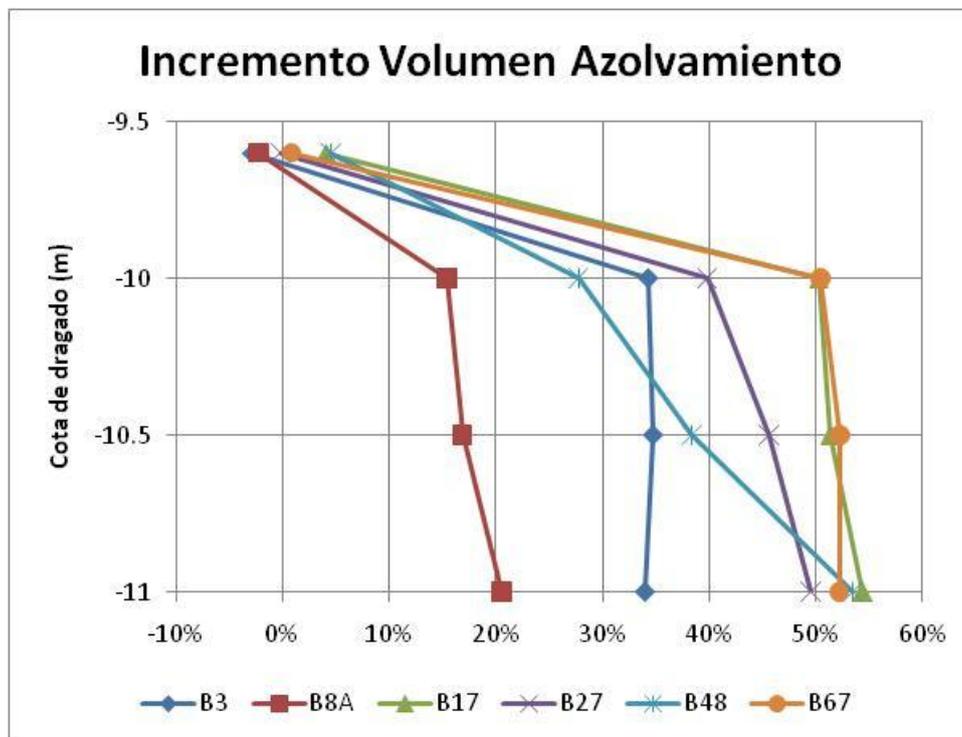
Obsérvese que al dragar el canal a la cota -9,6m, el incremento del volumen de azolvamiento, en todos los tramos, es menor a  $\pm 5\%$ . Nótese también que los principales cambios ocurren al pasar de -9,6 a -10,0 m; en los tramos B17 y B67 se

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-0

incrementa el volumen de azolvamiento en 50%. Dragar más allá de la cota -10,0 m modifica ligeramente el volumen de dragado en casi todos los tramos. Por ejemplo, en los tramos B17 y B67, al dragar a -10,5 ó -11,0 m hace que el incremento en el volumen de azolvamiento pasa a 52 y 54%, respectivamente.

No obstante, el tramo B48 no se comporta de la misma manera, la tasa de sedimentación se incrementa de manera más uniforme. Cuando se draga el canal a la cota -9,6 m el volumen de azolvamiento se incrementa en 5%; cuando se draga a la cota -10,0 m el volumen de azolvamiento se incrementa a 28%, cuando se draga a la cota -10,5 m el volumen de azolvamiento se incrementa a 38%, cuando se draga a la cota -11,0 m el volumen de azolvamiento se incrementa a 53%. En todos los casos el incremento es respecto al caso base.

Figura 79. Incremento del volumen de azolvamiento anual (%) respecto al caso base, para los diferentes escenarios de dragado, en cada uno de los tramos que se dividió el canal.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

### 16.8. Modelación Mike 21 – Módulos

A continuación se presentan las Ecuaciones que rigen el Modelo, MIKE 21 The Hydrodynamic Module:

**Ecuaciones del modelo.** El sistema de modelado está basado en soluciones numéricas, "Reynolds average Navier-Stokes equations" (ecuación de movimiento para flujos de fluidos) sujetas a las suposiciones de Boussinesq y a la presión hidrostática. Así, el modelo consta de continuidad, impulso, temperatura, salinidad y ecuaciones de densidad y se cierra mediante un esquema de cierre turbulento. La densidad no depende de la presión sólo de la temperatura y salinidad. A continuación las ecuaciones que gobiernan el modelo son presentadas.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-1

La ecuación local de continuidad se escribe como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Y las dos ecuaciones de momento horizontales para el componente en “X” y el componente en “Y”, respectivamente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \\ = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} \\ = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned}$$

Temperatura y salinidad. The Hydrodynamic Module (HD), los cálculos de los transportes de temperatura “T” y salinidad “s” siguen la difusión general de las ecuaciones de transporte, como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S$$

Los términos de la difusión horizontal están definidos por:

$$(F_T, F_s) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

Significado de las variables

<b>t:</b>	tiempo
<b>x, y, z:</b>	coordenadas cartesianas
<b>u, v, w:</b>	componentes de la velocidad del flujo
<b>T, s:</b>	temperatura y salinidad
<b>Dv:</b>	turbulencia vertical (remolino) coeficiente de difusión
<b>H:</b>	duración de fuente debida al intercambio de calor con la atmósfera

<b>S:</b>	magnitud de la fuente debido a descargas puntuales
<b>Ts, Ss:</b>	temperatura y salinidad de la fuente
<b>FT, Fs, Fc:</b>	términos de la difusión horizontal
<b>h:</b>	profundidad

A continuación se presentan las Ecuaciones que rigen el Modelo, MIKE 21 The Mud Transport Module:

**Ecuaciones del modelo.** El transporte de lodos es generalmente descrito por las siguientes ecuaciones (e.g. Teisson, 1991):

$$\frac{\partial c^i}{\partial t} + \frac{\partial uc^i}{\partial x} + \frac{\partial vc^i}{\partial y} + \frac{\partial wc^i}{\partial z} - \frac{\partial w_s c^i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_{Tx}}{\sigma_{Tx}^i} \frac{\partial c^i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_{Ty}}{\sigma_{Ty}^i} \frac{\partial c^i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{Tz}}{\sigma_{Tz}^i} \frac{\partial c^i}{\partial z} \right) + S^i$$

Significado de las variables

<b>t:</b>	tiempo
<b>x, y, z:</b>	coordenadas cartesianas
<b>u, v, w:</b>	componentes de la velocidad del flujo
<b>DV :</b>	turbulencia vertical (remolino) coeficiente de difusión
<b>Ci :</b>	el componente escalar $i^{\text{th}}$ (definido como la concentración de masa)
<b>Wsi:</b>	velocidad de caída
<b><math>\sigma_{Tx}</math>:</b>	número de Schmidt
<b><math>v_{Tx}</math>:</b>	viscosidad anisotrópica del fenómeno “eddy”
<b>Si:</b>	término de la fuente

**Velocidades de asentamiento.** La velocidad de asentamiento de los sedimentos suspendidos puede ser especificada como un valor constante.

$$W_s = k \quad c < c_{floc}$$

Donde **W** es la velocidad de sedimentación y **k** es la constante.

La Floculación es descrita como una relación con la concentración de sedimentos suspendidos dada por Burt (1986).

$$w_s = k \times \left( \frac{c}{\rho_{sediment}} \right)^Y \quad c_{floc} > c > c_{hindered}$$

en donde **k** es una constante,  **$\rho_{sediment}$**  es la densidad de los sedimentos y **Y** es el coeficiente denominado “índice de asentamiento”.

**Asentamiento obstaculizado** (Hindered settling) puede ser aplicado si la concentración de sedimentos suspendidos excede cierto nivel. Después de que una

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-3

concentración de sedimentos relativamente alto se ha alcanzado, la columna de asentamiento de los flóculos empieza a intervenir y por este medio se reduce la velocidad de asentamiento. Fórmulas dadas por Richardson y Zaki (1954) además de Winterwerp (1999) son implementadas.

Para distinguir entre estos tres diferentes regímenes de asentamiento, dos fronteras serán definidas “**Cfloc**” y “**Chindered**” siendo las concentraciones donde la floculación y el asentamiento obstaculizado comienzan respectivamente.

**Depósito.** El depósito se describe como (Krone, 1962):

$$S_D = w_s c_b p_D$$

Donde “**ws**” es la velocidad de asentamiento de los sedimentos suspendidos (m/s), “**Cb**” es la concentración de sedimentos suspendidos cerca del lecho y “**pd**” es una expresión de la probabilidad del depósito.

$$p_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}$$

En **Mud Transport Module**, dos diferentes enfoques están disponibles para el cálculo de “**cb**”. Si el perfil Rouse es aplicado, el lecho cerca de las concentraciones está relacionado con la profundidad promedio de la concentración de sedimentos al multiplicar por la altura constante del centroide:

$$c_b = \bar{c} \times (\text{centroid height})$$

Teeter (1986) relaciona el lecho cerca de las concentraciones a el número de Peclet (**Pe**), los flujos de el lecho y la profundidad promedio de los sedimentos suspendidos. En este caso la concentración de sedimentos cerca del lecho es descrita como:

$$c_b = \bar{c} \times \left( 1 + \left( \frac{P_e}{1.25 + 4.75(p_d^{2.5})} \right) \right)$$

Donde “**Pe**” es el número de Peclet:

$$P_e = \frac{w_s h}{D_z}$$

“**h**” es la profundidad del agua, “**Dz**” es la difusión del remolino, ambos calculados por el modelo hidrodinámico.

**Erosión.** La erosión tiene las siguientes dos modalidades:

Lecho duro. Para un lecho consolidado la tasa de erosión puede ser escrita como (Parthenoades, 1965):

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-4

$$S_E = E \left( \frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)^n \quad \tau_b > \tau_c$$

Donde “E” es la erosionabilidad ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), “n” es el poder de la erosión, “ $\tau_b$ ” es el esfuerzo cortante del lecho ( $\text{N m}^{-2}$ ) y “ $\tau_{ce}$ ” es el esfuerzo cortante crítico para la erosión ( $\text{N m}^{-2}$ ). “ $S_E$ ” es la tasa de erosión ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Lecho blando. La tasa de erosión puede ser escrita como (Parchure and Mehta, 1985):

$$S_E = E \left( e^{\alpha \sqrt{\tau_b - \tau_c}} \right) \quad \tau_b > \tau_c$$

**Consolidación.** Cuando a largo plazo se lleva a cabo simulaciones de la consolidación de los sedimentos depositados puede ser un proceso importante. Si varias capas del lecho son usadas una tasa de transición (**Ti**) puede ser aplicada. Esto hará que los sedimentos de las capas superiores sean transferidos posteriormente a las capas inferiores.

## 16.9. Conclusiones

Se elaboró un modelo matemático para calcular la hidrodinámica y el transporte de sedimentos cohesivos del Estero Salado. El dominio de cálculo fue discretizado utilizando una malla no estructurada; la cual se hizo más densa a lo largo del canal de navegación en especial entre las boyas 36 y 54.

El impacto del desconocimiento de las condiciones iniciales se disipa rápidamente. En el modelo hidrodinámico se requiere de sólo un periodo de marea, mientras que para el modelo de transporte de sedimentos se requieren del orden de 3 periodos de marea. No obstante, para el modelo de advección (temperatura y salinidad) el impacto del desconocimiento de las condiciones iniciales se prolonga por más de 84 periodos de marea.

El modelo hidrodinámico se calibró comparando los resultados, utilizando varios valores del coeficiente de fricción, con las mediciones de nivel y velocidad en varios puntos del sistema. El mejor ajuste se obtuvo utilizando un coeficiente de Chezy igual a  $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ . Con este valor, el promedio de los errores en la determinación de los niveles del sistema son del orden del 7%, los errores en la determinación de la dirección de la velocidad son del orden del 26% y los errores en la determinación de la magnitud de la velocidad son del orden del 34%. El modelo se ajusta mucho mejor en la zona del Canal del Morro, Canal Cascajal y Estero Salado, donde los errores en la estimación de los niveles es menor al 3%.

Del modelo de transporte de sedimentos cohesivos se desprende que las fuentes de sedimentos que azolvan el Estero Salado y eventualmente ocasionan el azolvamiento del canal de navegación se localizan alrededor de éste, en los esteros localizados al Este y Oeste del Estero Salado y en los bajos que flanquean al canal al norte de Cascajal.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-5

El modelo de transporte de sedimentos cohesivos se calibró con las mediciones de concentración de sólidos en suspensión y los volúmenes de dragado medidos en algunos tramos del sistema. Resultando que el modelo subestima los volúmenes de dragado en 42%, lo cual está bastante bien porque representa el 57% de la desviación estándar de las mediciones.

El prisma de marea que entra al Estero Salado varía con la fase de la marea, pero puede decirse que es del orden de los  $600 \times 10^6 \text{ m}^3$ , con los cuales se estima que ingresan  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  mensuales de sólidos en suspensión.

Los diferentes escenarios simulados muestran que el dragado del canal de navegación influye muy poco en la hidrodinámica y el transporte de sedimentos del sistema en general. Dentro del canal, el dragado incrementa los tirantes, lo cual disminuye ligeramente las velocidades y el esfuerzo cortante de fondo; esto provoca una disminución en la cantidad de sedimentos que se ponen y mantienen en suspensión, por lo que se induce un incremento en la tasa de azolvamiento.

Por lo anterior, en caso de dragar el canal por debajo de la cota -9,6 m respecto al MLWS, el volumen de dragado de mantenimiento se incrementará, no sólo porque se incrementa la zona de dragado (ancho del canal), sino porque se incrementa también la tasa de sedimentación. El tramo que más incrementa su tasa de sedimentación por efectos del dragado es el entre las Boyas 39 a Boya 54, en especial en la Boya 48.

En la mayor parte del canal de navegación, los principales cambios en el volumen de azolvamiento ocurren al pasar de dragar el canal de -9,6 a -10,0 m. Más allá de la cota -10,0 m el volumen de azolvamiento se incrementa poco. En contraste, entre las Boyas 39 a Boya 54, en especial en la Boya 48. se incrementa continuamente el volumen de azolvamiento entre mayor sea el dragado.

## 16.10. Recomendaciones

Se plantea que el Modelo Hidrodinámico sea mantenga y alimente, para conseguir estos objetivos y se mejore la calidad del mismo se recomienda:

- Efectuar un levantamiento topo-batimétrico en todo el Estero Salado y Canal Cascajal, incluyendo las zonas que se descubren en bajamar, los canales del Golfo y los esteros que conectan con el Estero Salado, bajo iguales estándares.
- Efectuar varias campañas completas de mediciones de campo (por lo menos 3), de por lo menos una semana cada una, a lo largo de un año.
  - Incrementar el número de estaciones para medir niveles de la superficie libre del agua (mareógrafos), entre Enfilada C2 y Puerto Guayaquil.
  - Reubicar y reducir el número de estaciones para medir velocidades, temperatura y salinidad.
    - Incrementar el tiempo de medición en cada punto (por lo menos 48 horas).
    - Podría medirse la velocidad en toda la columna de agua o, en su defecto, a media profundidad (3m, por ejemplo).
    - La temperatura y salinidad del agua debe medirse a media profundidad.

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-6



- Instalar una estación mareográfica de APG en la conexión del Canal Cascajal y el Río Guayas, que sirva como condición de frontera del modelo, donde se midan los niveles de la superficie libre del agua y las velocidades de la corriente a media profundidad. De esta manera se podría eliminar el Río Guayas del dominio de cálculo.
- Instalar un mareógrafo en el Golfo de Guayaquil que funcione todo el año, y que se pueda acceder a la información.
- Incrementar el número de estaciones y el tiempo de medición de la concentración de sólidos en suspensión en cada punto (por lo menos 48 horas).
- Efectuar un levantamiento batimétrico trimestral, del canal de navegación, entre las boyas 36 y 54.
- Efectuar un levantamiento batimétrico anual, del Estero Salado y el canal de navegación, entre las boyas 36 y 54.
- Contar con la hidrografía (gasto líquido y sólido) de los esteros que conectan con el Estero Salado.
- Delimitar la cobertura de mangle.

#### 16.11. Bibliografía

- Manual de Modelamiento Matemáticos Envirosoft 2000
- <http://mikebydhi.com/Products/CoastAndSea/MIKE21.aspx>

Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Junio 2012	16-7