
PUERTO MARITIMO DE GUAYAQUIL



FASE II - CAPITULO 12 Preparación para la corrida del Modelamiento Matemático

Realizado por:



Preparado para:



Guayaquil, Febrero del 2012



TABLA DE CONTENIDO

12.	PREPARACIÓN PARA LA CORRIDA DEL MODELAMIENTO MATEMÁTICO	12-3
12.1.	Antecedentes	12-3
12.2.	Software propuesto para la Modelación	12-3
12.3.	Modelación Hidrodinámica y de Transporte	12-4
12.4.	Dominio Espacial	12-4
12.5.	Modulo Hidrodinámico - Batimetría	12-5
12.6.	Dominio Temporal	12-7
12.7.	Condiciones Iniciales	12-7
12.8.	Condiciones de Frontera	12-7
12.9.	Simulaciones de Prueba	12-8
12.10.	Calibraciones del Modelo	12-8
12.11.	Escenarios de cálculo	12-13
12.12.	Resultados a entregar	12-13
12.13.	Modelación Mike 21 – Módulos	12-14
12.14.	Generación de la Malla	12-18
12.15.	Bibliografía	12-19

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: Febrero 2012	12-1



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. MIKE 21 Hydrodynamic Module Batimetría Guayaquil, Ecuador.....	12-4
Figura 2. Localización del dominio de cálculo y delimitación del área de calibración.....	12-5
Figura 3. Batimetría, estero de Guayaquil, Ecuador.....	12-6
Figura 4. Gráfico de la batimetría ajustada, estero de Guayaquil, Ecuador.....	12-6
Figura 5. Gráfico de la batimetría interpolada, estero de Guayaquil, Ecuador.....	12-7
Figura 6. Localización de las estaciones de medición para la calibración del modelo.....	12-10
Figura 7. Modelo digital a detalle de la elevación del fondo.....	12-11
Figura 8. Modelo de la elevación del fondo con isolíneas a cada 2 m.....	12-12
Figura 9. Ejemplo de comparación entre la concentración de sedimentos suspendidos simuladas y medidas en Graadyb, Denmark.....	12-13
Figura 10. Discretización espacial Guayaquil, Ecuador.....	12-18

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: Febrero 2012	12-2

12. PREPARACIÓN PARA LA CORRIDA DEL MODELAMIENTO MATEMÁTICO

12.1. 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.

12.2. Software propuesto para la Modelación

MIKE 21 HD es un modelo básico para el cálculo hidrodinámico de todo el software MIKE 21, proporcionando la base hidrodinámica para otros módulos como advección-dispersión (AD), calidad de aguas (ECOLab), transporte de arenas (ST) o fangos (MT). El MIKE 21 simula las variaciones de las variables en los tirantes de agua y flujo debido a multitud de factores que afectan a lagos, estuarios bahías o zonas costeras. Los niveles de agua y flujo se calculan con mallas rectangulares, curvilineares, mallas con elementos triangulares o una combinación de estas que cubren el área de interés.

Las condiciones de contorno hidrográficas se pueden especificar como niveles o flujos constantes o variables (tiempo y espacio) dentro de los contornos del modelo, como constante o variable fuente o sumidero en el modelo y como nivel superficial inicial libre aplicado en todo el modelo. MIKE 21 HD se puede aplicar en una gran variedad de fenómenos hidráulicos y relacionados con ellos. Esto incluye modelización de la hidráulica de las mareas, transporte de sedimentos. Es un modelo hidráulico general que se configura fácilmente para definir fenómenos hidráulicos específicos. Algunos ejemplos de aplicación son:

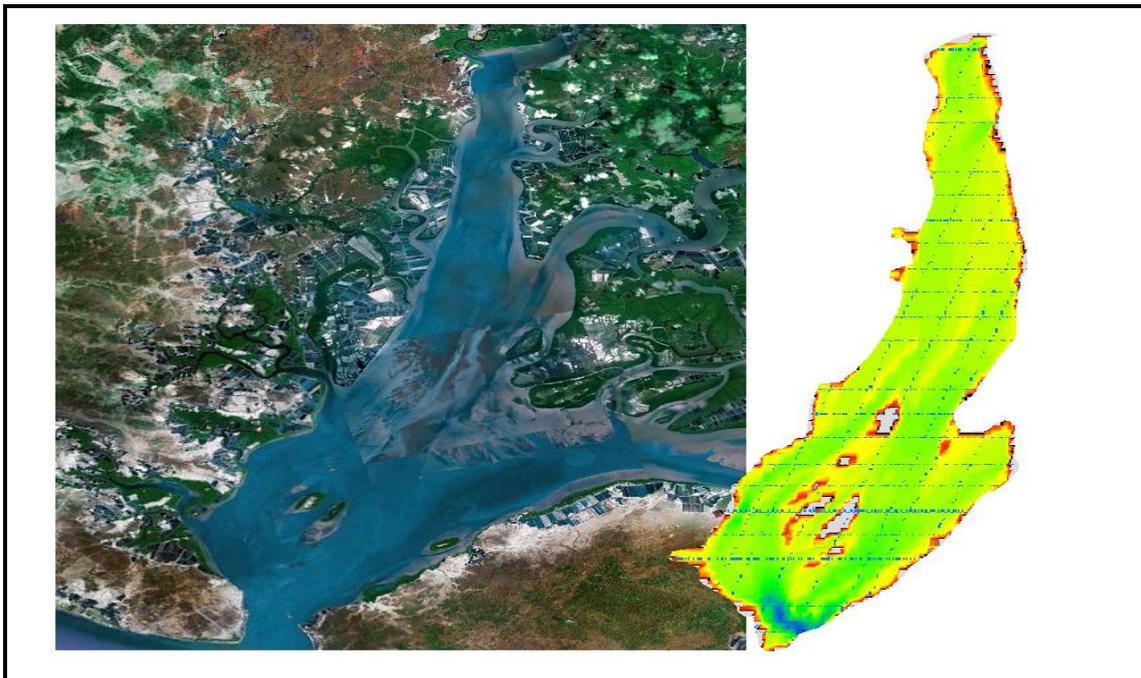
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Febrero 2012	12-3

- Intercambio de mareas y corrientes
- Transporte de sedimentos
- Circulaciones secundarias, viscosidades y vórtices

12.3. Modelación Hidrodinámica y de Transporte

La hidrodinámica (niveles y velocidades) y transporte de sedimentos (concentraciones en suspensión y fondo) dentro del canal de navegación de la Terminal Marítima Simón Bolívar se simula como ya se indicó el software del DHI (mike21 HD+MT).

Figura 1. MIKE 21 Hydrodynamic Module Batimetría Guayaquil, Ecuador.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

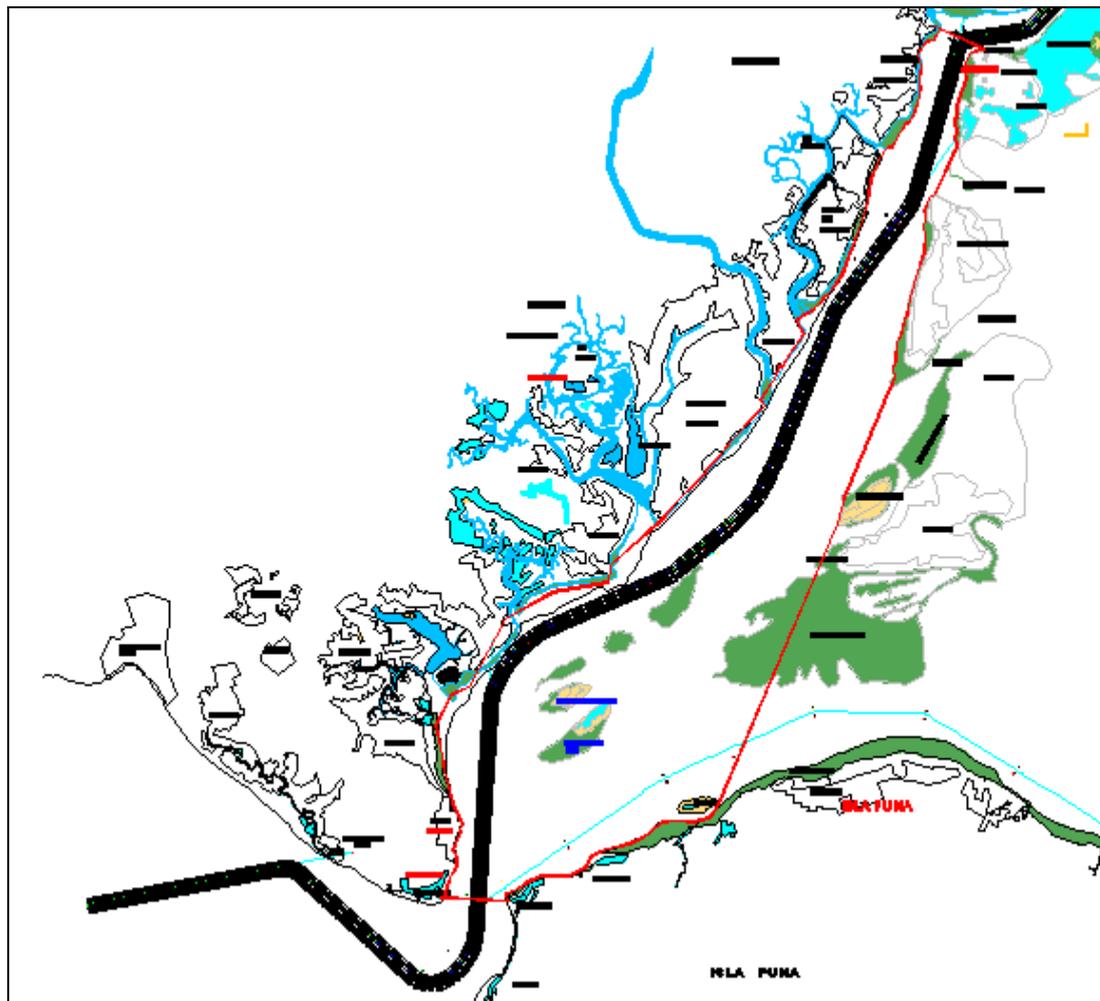
La hidrodinámica del canal de navegación es responsabilidad únicamente de la marea y que el transporte de sedimentos es responsabilidad únicamente de estas corrientes de marea. Por lo tanto, aunque se incluye el efecto de la diferencia de salinidad, no se simula el efecto 3D de la cuña salina (diferencias de velocidad a lo largo de la columna de agua) y no se considera el paso de las embarcaciones en el transporte de sedimentos. En función de la calidad y cantidad de la información de campo recabada, se calibrarán ambos modelos, tanto el hidrodinámico, como el de transporte de sedimentos.

12.4. Dominio Espacial

A fin de simular correctamente la hidrodinámica, la zona a calibrar se limita al canal de navegación (área en rojo mostrada en la misma figura 2). El dominio de cálculo se discretizará usando una malla no estructurada que permita usar elementos de diferentes tamaños, a fin de no perder resolución en las zonas estrechas.

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: Febrero 2012	12-4

Figura 2. Localización del dominio de cálculo y delimitación del área de calibración.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

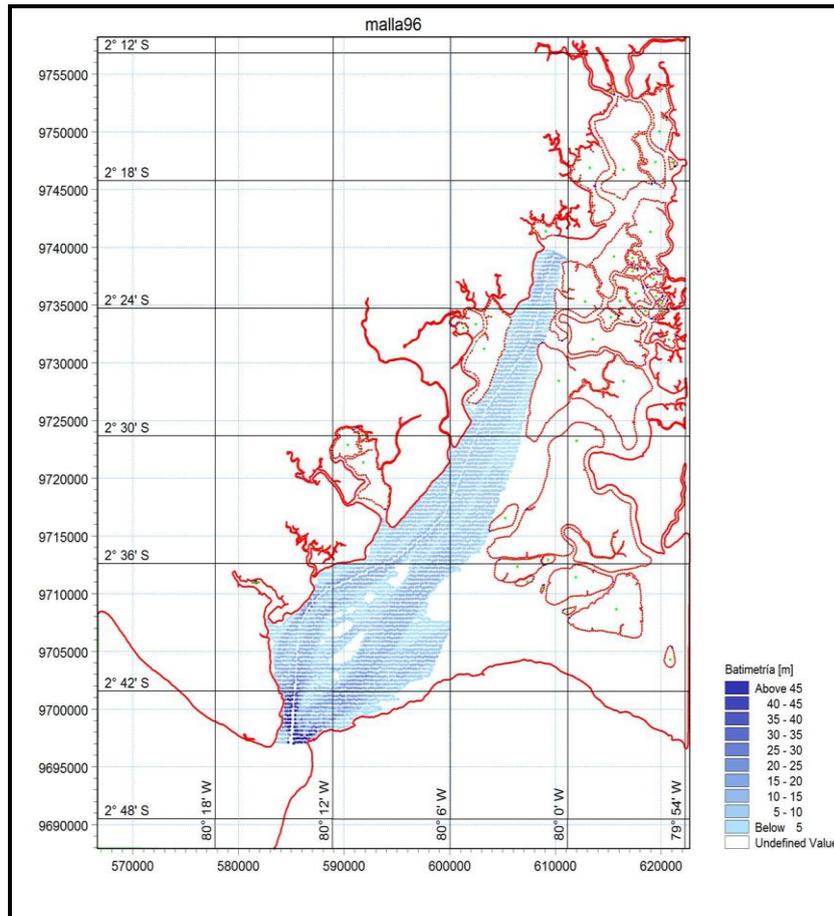
12.5. Modulo Hidrodinámico - Batimetría

El Modulo Hidrodinámico simula los cambios del nivel de agua, flujos inestables tomando en cuenta variaciones en la densidad, batimetría y fuerzas externas en llanuras inundables, lagos, estuarios y zonas costeras. Algunas áreas típicas de aplicación son:

- Evaluación de estudios de impacto ambiental.
- Optimización de las infraestructuras de protección portuaria y costera.
- Inundaciones costeras y marejadas.
- Inundaciones tierra adentro y modelado de flujo superficial.

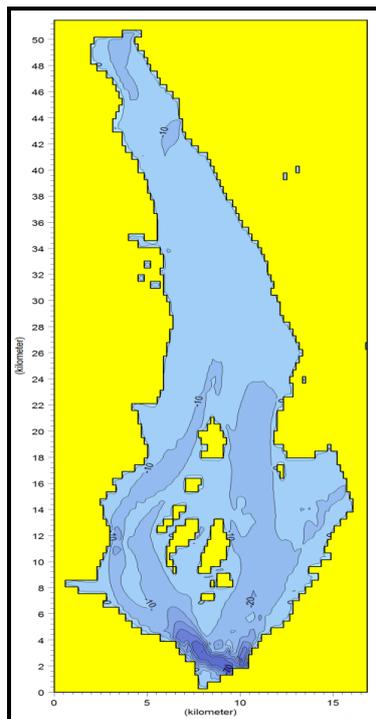
Autoridad Portuaria de Guayaquil	Contrato: Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. respecto al MLWS.	Revisión: 1	Página
Asociación Geoestudios – Consulsua	Contrato No. 41 – 2011	Fecha: Febrero 2012	12-5

Figura 3. Batimetría, estero de Guayaquil, Ecuador.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

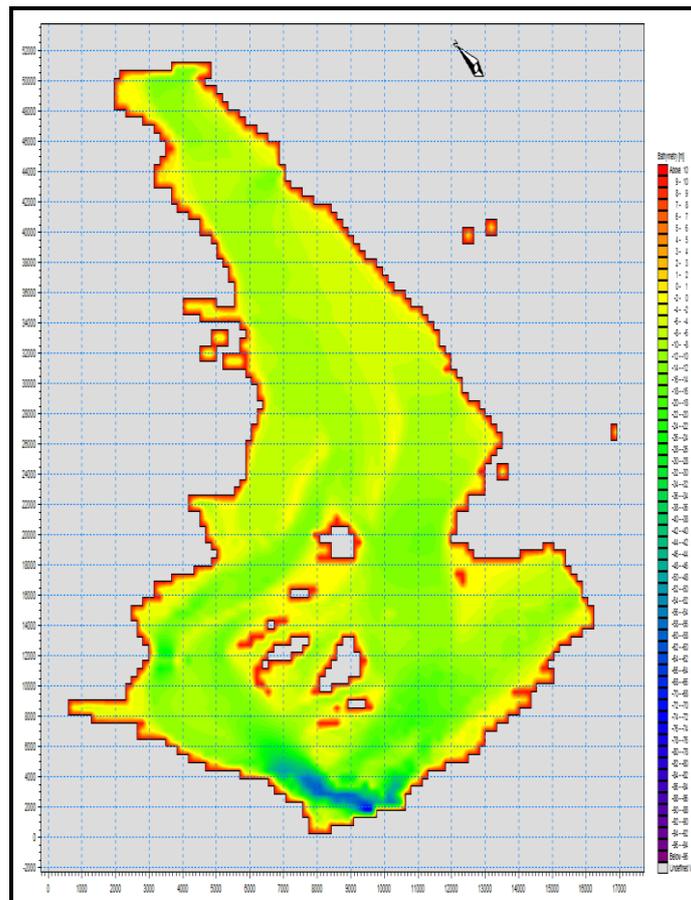
Figura 4. Gráfico de la batimetría ajustada, estero de Guayaquil, Ecuador.



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: Febrero 2012	12-6

Figura 5. Gráfico de la batimetría interpolada, estero de Guayaquil, Ecuador.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

12.6. Dominio Temporal

Se utilizarán dos periodos de cálculo para la calibración: La etapa cálida y húmeda (Diciembre a Mayo) y la etapa fría y seca (Junio a Noviembre). Para la simulación de escenarios (cálculo del impacto de la cota de dragado en las tasas de sedimentación) se utilizará un dominio temporal de 1 a 2 años.

12.7. Condiciones Iniciales

Como condiciones iniciales se supone que el dominio de cálculo se encuentra en reposo (mismo nivel en toda su extensión), 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 es errónea, los resultados de los primeros periodos de marea (no puede anticiparse cuántos) no serán útiles para el diseño de las obras.

12.8. Condiciones de Frontera

En las 3 fronteras del dominio se ha recabado información para de cada uno de los dominios de tiempo a simular:

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: Febrero 2012	12-7

- Nivel del agua (marea en la frontera C y limnigrama correspondiente a la misma marea en las fronteras A y B).
- Salinidad.
- Concentración de sedimentos (sedimentograma).

Además de la información anterior, se está recabando información de cada una de las aportaciones de agua al dominio de cálculo a lo largo de cada uno de los dominios de tiempo a simular:

- Gastos (hidrograma).
- Salinidad.
- Concentración de sedimentos (sedimentograma).

12.9. Simulaciones de Prueba

Dado que las condiciones iniciales no son correctas, será necesario correr el modelo bajo las diferentes condiciones de estudio, para determinar el número de periodos de marea que no son útiles (periodo de calentamiento).

12.10. Calibraciones del Modelo

Para la calibración del modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos (HD+MT) se requiere de la siguiente información en los puntos especificados en la Figura 6, en varios momentos de los dominios de tiempo empleados para este efecto.

Mareógrafos. Se requiere por lo menos tres mareógrafos, fronteras A, B y C (mar abierto), funcionando las 24 horas por lo menos durante los periodos de calibración. Su finalidad es la determinación de las constantes armónicas de la marea y establecimiento de las condiciones de frontera.



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: Febrero 2012	12-8



Mareógrafo C2

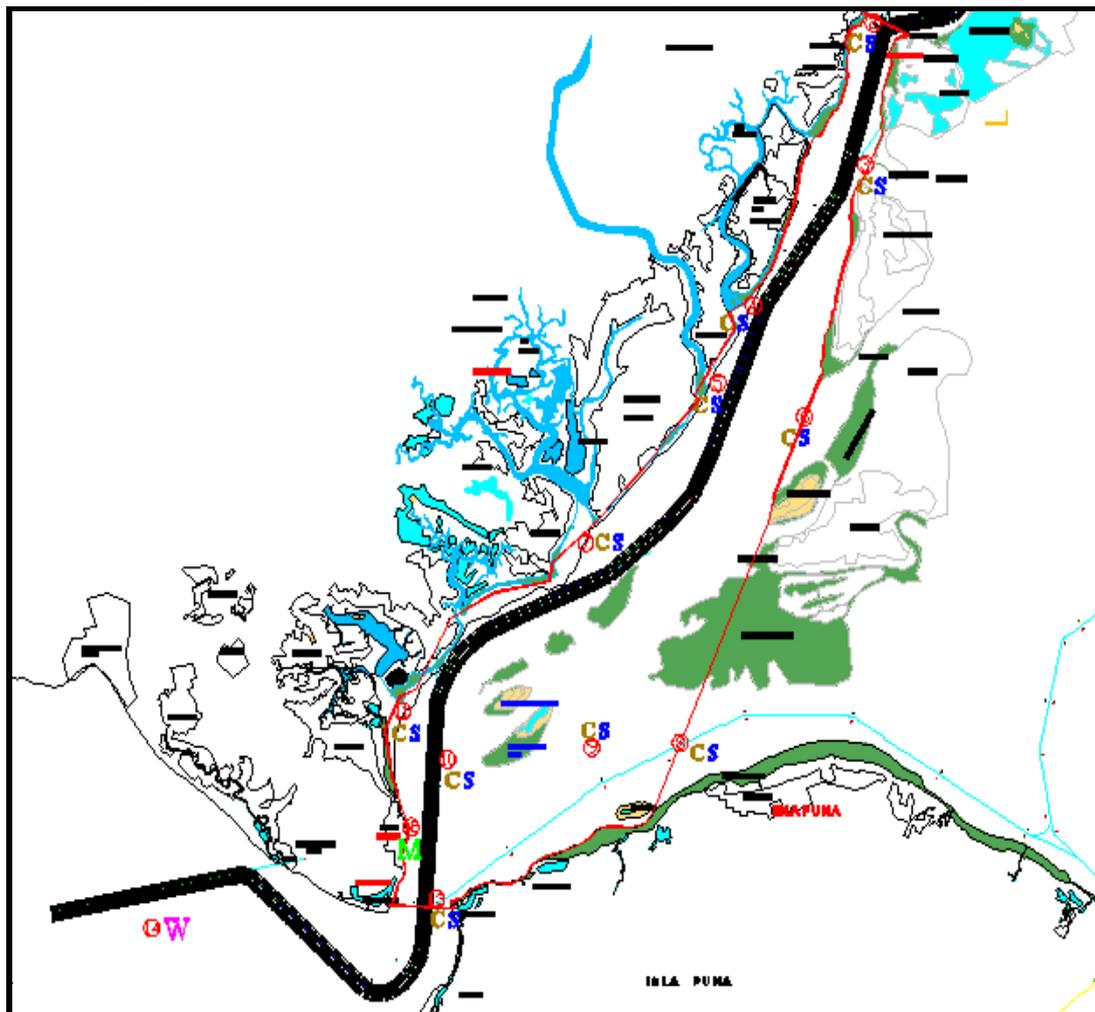


Mareógrafo Guayaquil

En combinación con las mediciones de velocidad servirán también para la calibración de la rugosidad del fondo. Se requiere que las mediciones sean simultáneas (todas las estaciones a la misma hora). Serían suficientes lecturas a cada 15 minutos durante las horas de luz. Sería conveniente programar por lo menos una campaña nocturna, a fin de medir por lo menos un periodo de marea completo en cada punto, a fin de medir con precisión el amortiguamiento y el desfaseamiento en diferentes puntos.

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: Febrero 2012	12-9

Figura 6. Localización de las estaciones de medición para la calibración del modelo.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

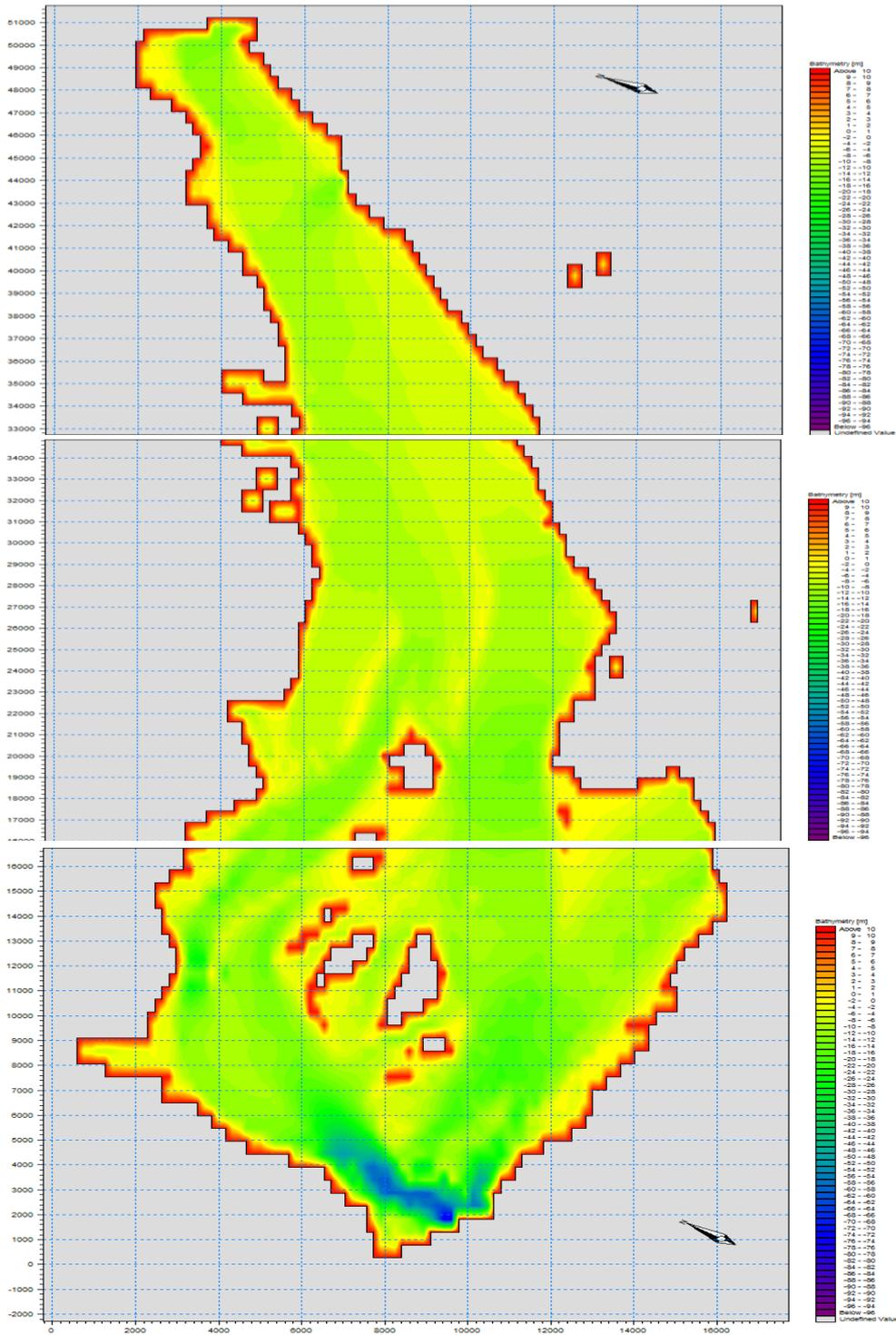
Salinidad y temperatura. Se requiere que las mediciones sean simultáneas. Serían suficientes lecturas a cada hora durante las horas de luz.

Corrientes (velocidades) y concentración de sedimentos. Su finalidad es la calibración del modelo. Las mediciones de concentración de sedimentos deben realizarse en el mismo sitio y a la misma hora que las mediciones de velocidad y deben incluir la medición del tirante. Sería conveniente que las mediciones de corrientes fueran simultáneas (todas las estaciones a la misma hora). Serían suficientes lecturas a cada 3 horas durante las horas de luz, procurando medir a las horas de máxima velocidad en el flujo y reflujo.

Modelo digital de la elevación del fondo. Posterior de la batimetría. Se requiere la batimetría en todo el dominio de cálculo al inicio y término de cada periodo de calibración. Su finalidad es la calibración del modelo de transporte (determinación de zonas de depósito y erosión).

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: Febrero 2012	12-10

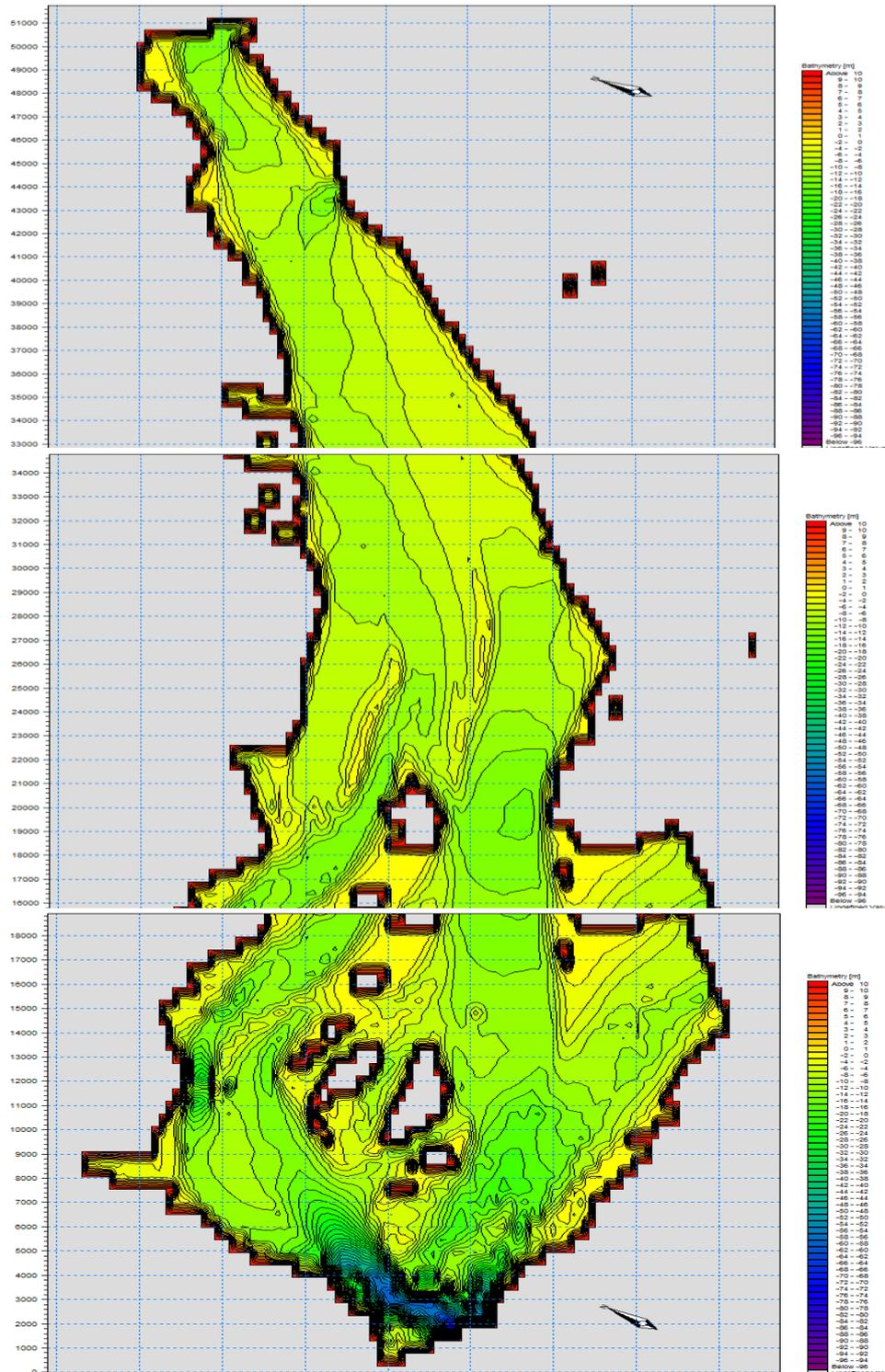
Figura 7. Modelo digital a detalle de la elevación del fondo.



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: Febrero 2012	12-11

Figura 8. Modelo de la elevación del fondo con isolíneas a cada 2 m.



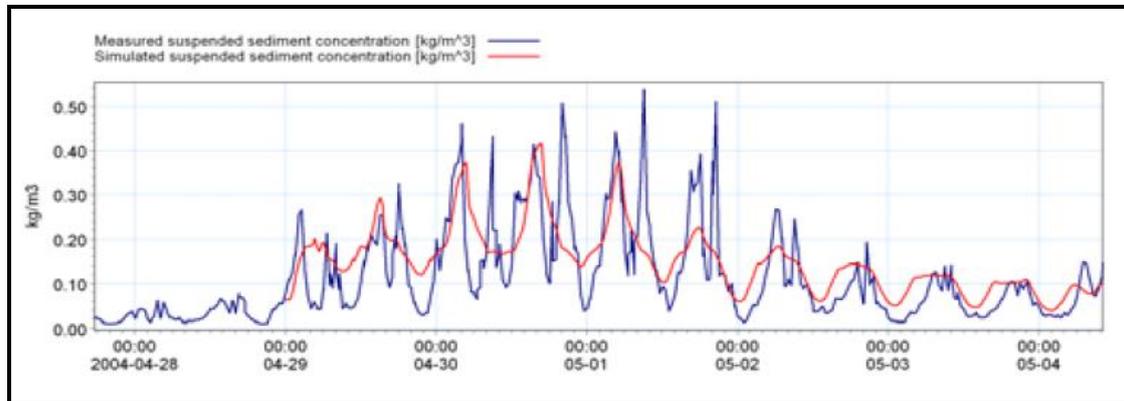
Fuente: Grupo de Trabajo 2012

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: Febrero 2012	12-12

12.11. Escenarios de cálculo

Se simulará durante un año o dos los cambios en las tasas de sedimentación (zonas de depósito y erosión) provocadas por cuatro posibles cotas de dragado del canal de navegación: 9.75 m, 10 m, 10.50 m y 11 m respecto al MLWS.

Figura 9. Ejemplo de comparación entre la concentración de sedimentos suspendidos simuladas y medidas en Graadyb, Denmark.



Fuente: Grupo de Trabajo 2012

12.12. Resultados a entregar

Para las simulaciones de calibración, en los puntos de medición:

- Serie de tiempo de niveles, comparando medido y calculado.
- Serie de tiempo de velocidades, comparando medido y calculado.
- Serie de tiempo de concentración de salinidad, comparando medido y calculado.
- Serie de tiempo de concentración de sedimentos, comparando medido y calculado.

Para cada uno de los escenarios se entregarán las siguientes figuras:

- Serie de tiempo de niveles, en varios puntos: canal de navegación.
- Serie de tiempo de velocidades, en varios puntos del canal de navegación.
- Serie de tiempo de concentración de salinidad, en varios puntos: canal de navegación.
- Serie de tiempo de concentración de sedimentos, en varios puntos del canal de navegación.

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: Febrero 2012	12-13

- Campo de velocidades dentro del dominio de cálculo, vista completa del dominio: marea ascendente, marea descendente.
- Distribución de la concentración de salinidad dentro del dominio de cálculo, vista completa del dominio: marea ascendente, marea descendente.
- Distribución de la concentración de sedimentos en suspensión dentro del dominio de cálculo, vista completa del dominio: marea ascendente, marea descendente.
- Distribución del espesor de sedimentos dentro del dominio de cálculo, vista completa del dominio. Zonas de depósito y erosión al final de la simulación.

12.13. 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.

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:

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

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

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: Febrero 2012	12-14

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

t:	tiempo
x, y, z:	coordenadas cartesianas
u, v, w:	componentes de la velocidad del flujo
T, s:	temperatura y salinidad
Dv:	turbulencia vertical (remolino) coeficiente de difusión
H:	duración de fuente debida al intercambio de calor con la atmósfera
S:	magnitud de la fuente debido a descargas puntuales
Ts, Ss:	temperatura y salinidad de la fuente
FT, Fs, Fc:	términos de la difusión horizontal
h:	profundidad

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

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

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

Significado de las variables

t:	tiempo
x, y, z:	coordenadas cartesianas

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: Febrero 2012	12-15

- u, v, w:** componentes de la velocidad del flujo
DV : turbulencia vertical (remolino) coeficiente de difusión
Ci : el componente escalar *i*th (definido como la concentración de masa)
Wsi: velocidad de caída
 σ_{Tx} : número de Shmidt
 ν_{Tx} : viscosidad anisotrópica del fenómeno “eddy”
Si: 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 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.

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

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: Febrero 2012	12-16

En **Mud Transport Module**, dos diferentes enfoques están disponibles para el cálculo de “ c_b ”. 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 (P_e), 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 “ P_e ” es el número de Peclet:

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

“ h ” es la profundidad del agua, “ D_z ” 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):

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

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

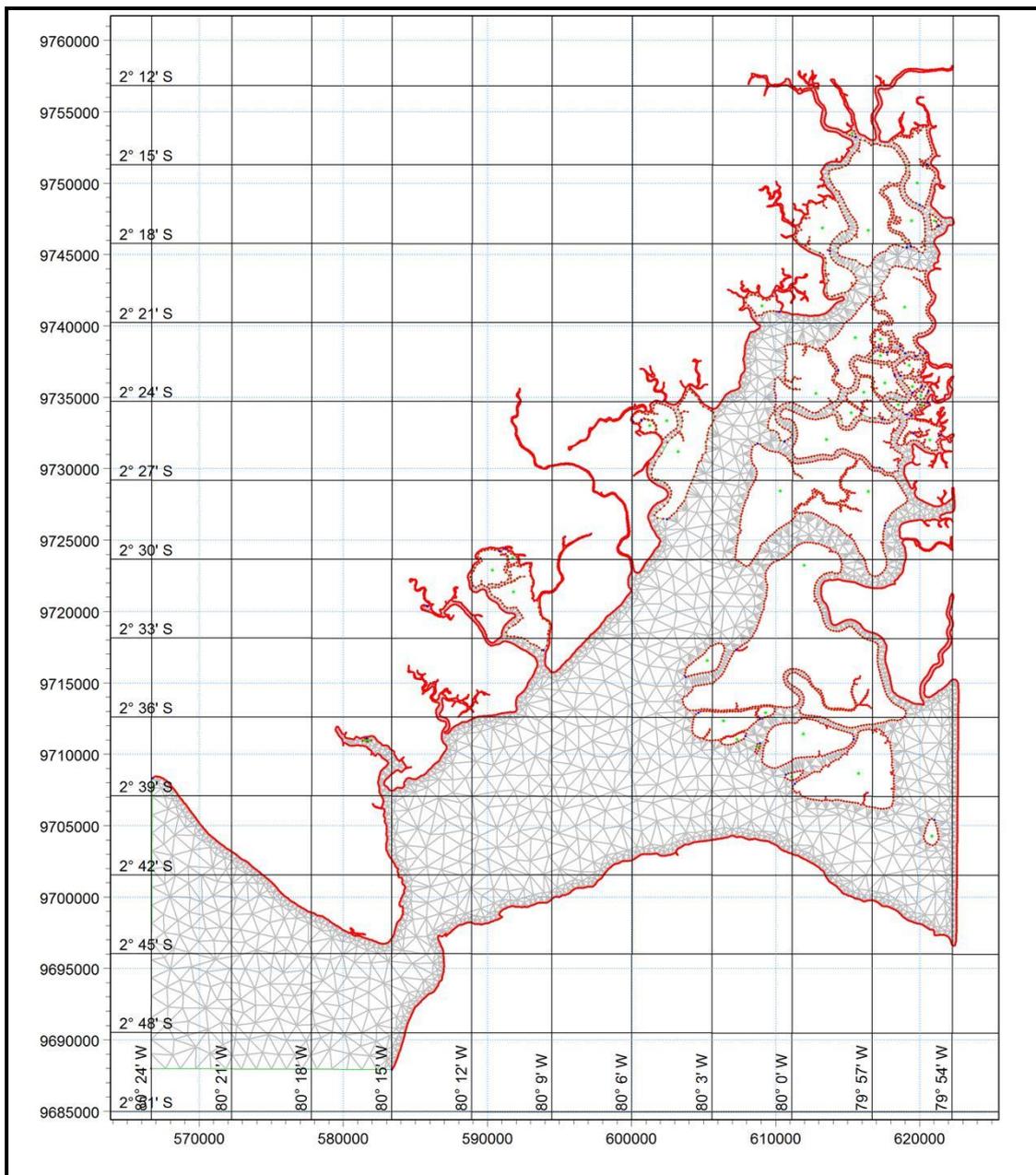
$$S_E = E \left(e^{\alpha \sqrt{(\tau_b - \tau_c)}} \right) \quad \tau_b > \tau_c$$

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 (T_i) puede ser aplicada. Esto hará que los sedimentos de las capas superiores sean transferidos posteriormente a las capas inferiores.

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: Febrero 2012	12-17

12.14. Generación de la Malla

Figura 10. Discretización espacial Guayaquil, Ecuador.



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: Febrero 2012	12-18



12.15. Bibliografía

- Manual de Modelamiento Matemáticos Envirossoft 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: Febrero 2012	12-19