



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS  
EN LA DESEMBOCADURA DEL CAUCE DEL RÍO GRIJALVA-  
USUMACINTA, TABASCO, MÉXICO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS**  
(OCEANOGRAFÍA FÍSICA)

PRESENTA:  
**LEONID IGNACIO MÁRQUEZ GARCÍA**

**TUTOR PRINCIPAL:**

DR. DAVID ALBERTO SALAS DE LEÓN  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

**COMITÉ TUTOR:**

DR. JAVIER ALDECO RAMÍREZ  
Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco  
DR. JOSÉ NOEL CARBAJAL PÉREZ  
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica  
DRA. CECILIA ELIZABETH ENRÍQUEZ ORTÍZ  
Facultad de Ciencias, UMDI Sisal  
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN  
Instituto de Ingeniería

**MÉXICO, CD. MX., JUNIO, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



*Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología*  
Universidad Nacional Autónoma de México



# **DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LA DESEMBOCADURA DEL CAUCE DEL RÍO GRIJALVA- USUMACINTA, TABASCO, MÉXICO**

## **T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**  
(OCEANOGRÁFIA FÍSICA)

P R E S E N T A :

**LEONID IGNACIO MÁRQUEZ GARCÍA**

### **TUTOR PRINCIPAL:**

DR. DAVID ALBERTO SALAS DE LEÓN  
Instituto de Ciencias del Mar Y Limnología

### **COMITÉ TUTOR:**

DR. JAVIER ALDECO RAMÍREZ  
Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco  
DR. JOSÉ NOEL CARBAJAL PÉREZ  
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica  
DRA. CECILIA ELIZABETH ENRÍQUEZ ORTÍZ  
Facultad de Ciencias, UMDI Sisal  
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN  
Instituto de Ingeniería

**MÉXICO, CD. MX., JUNIO, 2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, profesores e integrantes de la coordinación del posgrado, por todo el apoyo recibido para la elaboración de este trabajo y las enseñanzas concedidas para mi desarrollo profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo financiero a través de su programa de becas para maestría (CONACYT - 562904).

A mi Tutor Dr. David Alberto Salas de León, por el apoyo y orientación otorgados para el desarrollo y elaboración de este trabajo.

A los miembros de mi Comité Tutor, Dra. Cecilia Enríquez, Dr. Javier Aldeco, Dr. Noel Carbajal y Dr. Rodolfo Silva, por la orientación que me dieron para la elaboración de este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS PERSONALES**

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, por permitir el uso de sus instalaciones y proporcionarme un espacio de trabajo.

Al Laboratorio de Sedimentología del Instituto de ciencias del mar y limnología en especial al M. en C. Eduardo A. Morales, por su apoyo en el análisis de muestras para determinación de tamaño de partículas con Laser.

A mis padres, por todo su apoyo y enseñanzas de vida, que son la base de todos mis logros profesionales y personales, y que han hecho posible la realización de este trabajo.

Al M. en C. Gilberto Exposito Díaz, por promover la elaboración de este proyecto de tesis.

A la Biol. Marcia Santana Carrillo, por su apoyo en la edición de este trabajo y como alumnos del posgrado.

A mi familia, por ser una gran inspiración para la superación personal.

## CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
Resumen .....	1
Abstract .....	1
1. Introducción.....	3
2. Justificación.....	5
3. ANTECEDENTES.....	7
4. Marco teórico.....	9
4.1 Modelo para el cálculo de sólidos suspendidos.....	10
4.2 Suspensión de los sedimentos del fondo en una corriente.....	12
5. Localización del área de estudio.....	23
5.1 Características hidrológicas del área de estudio .....	23
6. Objetivos .....	25
6.1 Objetivo General .....	25
6.2 Objetivo Particular.....	25
7. Metodología.....	26
7.1 Etapa de campo - Mediciones y muestreo.....	26
7.2 Etapa de laboratorio y gabinete - Análisis de muestras de agua y procesamiento de datos .....	28
8. Resultados.....	33
8.1 Componentes vectoriales u y v del vector velocidad .....	33
8.2 Retrodispersión (Backscatter) .....	40
8.3 Caudales.....	42
8.4 Modelo matemático para la estimación de concentración de sólidos suspendidos (CSS) con los valores de Retrodispersión (backscatter).....	43
8.5 Concentración de Sólidos en Suspensión transportados por el Río Grijalva- Usumacinta.....	47
8.6 Cantidad de sedimentos descargado por el Río Grijalva-Usumacinta .....	51
8.7 Características de los sedimentos en suspensión .....	53
8.8 Resuspensión de sedimentos .....	54

8.9	Distribución de parámetros físicos en el Río Grijalva-Usumacinta.....	58
8.10	Análisis de precipitación y caudal de los años 2010 y 2011 en la cuenca del Río Grijalva-Usumacinta.....	65
9.	Discusión.....	69
10.	Conclusiones.....	73
	Referencias.....	74
	ANEXOS.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Flujo helicoidal presente en meandros.....	20
Figura 4.2. Representación gráfica de los efectos producidos por la fuerza centrífuga en una corriente con trayectoria curva.....	21
Figura 5.1. Localización del área de estudio, cercano a la desembocadura del Río Grijalva.....	23
Figura 7.1. Esquema de distribución de puntos de muestreo de agua para análisis de sólidos suspendidos.....	27
Figura 7.2. Esquema de localización de las secciones sondeadas para parámetros físico con equipo multiparamétrico YSI.....	28
Figura 7.3. Material de filtración a) Filtros para análisis de sólidos mayores de 0.45 $\mu\text{m}$ , b) dispositivo de filtración.....	29
Figura 7.4. Esquema que muestra el ajuste de sistema de referencia, para la dirección de la velocidad de corriente.....	30
Figura 7.5. Localización de estaciones meteorológicas e hidrométricas en la cuenca del río Grijalva Usumacinta.....	32
Figura 8.1. Gráficas de mareas registradas en la estación “Frontera, Tab”; obtenidas del Servicio Mareográfico Nacional. La parte en rojo de la línea indica la época de los muestreos.....	33
Figura 8.2. Distribución de la componente vectorial $v$ de la velocidad, en octubre de 2010.....	34
Figura 8.3. Distribución de la componente vectorial $v$ de la velocidad, en septiembre de 2011.....	35
Figura 8.4. Distribución de la componente vectorial $v$ de la velocidad, en noviembre de 2011.....	36
Figura 8.5. Distribución de la componente vectorial $u$ de la velocidad, en octubre de 2010.....	37
Figura 8.6. Distribución de la componente vectorial $u$ de la velocidad, en septiembre de 2011.....	38
Figura 8.7. Distribución de la componente vectorial $u$ de la velocidad, en noviembre de 2011.....	39
Figura 8.8. Distribución de las magnitudes de retrodispersión, en octubre de 2010.....	40
Figura 8.9. Distribución de las magnitudes de retrodispersión, en septiembre de 2011... ..	41
Figura 8.10. Distribución de las magnitudes de retrodispersión, en noviembre de 2011... ..	42
Figura 8.11. Gráfica de dispersión y línea de tendencia de la concentración de sólidos suspendidos y los valores de retrodispersión.....	45
Figura 8.12. Regresión lineal obtenida con los valores del logaritmo base 10 de las concentraciones de sólidos suspendidos y los valores de retrodispersión.....	46

Figura 8.13. Resultante del análisis de residuos, la distribución de los puntos indica homocedasticidad del modelo y la aleatoriedad de los datos.....	47
Figura 8.14. Distribución de la concentración de sólidos suspendidos [gr/l], en octubre de 2010. ....	48
Figura 8.15. Distribución de la concentración de sólidos suspendidos [gr/l], en septiembre de 2011.....	49
Figura 8.16. Distribución de la concentración de sólidos suspendidos [gr/l], en noviembre de 2011.....	50
Figura 8.17. Imágenes satelitales de las plumas de sedimentos en la zona de monitoreo, (imágenes, Google Earth®, 2015). ....	51
Figura 8.18. Diferencia de velocidades medidas y las velocidades críticas $u_{cr,s}$ para determinar presencia de resuspensión de sedimentos del lecho del río, octubre 2010. ...	56
Figura 8.19. Diferencia de velocidades medidas y las velocidades críticas $u_{cr,s}$ para determinar presencia de resuspensión de sedimentos del lecho del río, septiembre 2011. ....	57
Figura 8.20. Diferencia de velocidades medidas y las velocidades críticas $u_{cr,s}$ para determinar presencia de resuspensión de sedimentos del lecho del río, noviembre 2011. ....	58
Figura 8.21. Distribución de temperatura (°C) en la sección transversal en septiembre y noviembre de 2011. ....	59
Figura 8.22. Distribución de temperatura (°C) en la sección longitudinal en septiembre y noviembre de 2011. ....	60
Figura 8.23. Distribución de salinidad en la sección transversal en septiembre y noviembre de 2011.....	61
Figura 8.24. Distribución de salinidad en la sección longitudinal en septiembre y noviembre de 2011. ....	62
Figura 8.25. Distribución de sigma-t ( $kg/m^3$ ) en la sección transversal en septiembre y noviembre de 2011. ....	63
Figura 8.26. Distribución de sigma-t ( $kg/m^3$ ) en la sección longitudinal en septiembre y noviembre de 2011. ....	64
Figura 8.27. Ubicación y anchura de la barra de la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta en septiembre y noviembre 2011. ....	65
Figura 8.28. Datos diarios de precipitación mm en la cuenca del río Grijalva-Usumacinta, 2010-2011. ....	67
<i>Figura 8.29. Datos diarios del caudal en la cuenca del río Grijalva-Usumacinta, 2010-2011. ....</i>	<i>68</i>



## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 4.1. Escala de tamaño de partícula de sedimento de Friedman y Sanders (1978).	14
Tabla 7.1. Muestras colectadas durante septiembre de 2011. Ubicación de la muestra (x,y) en UTM.....	27
Tabla 7.2. Estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca del Río Grijalva-Usumacinta.....	31
Tabla 8.1. Caudales totales medidos en las temporadas de octubre de 2010, septiembre y noviembre de 2011 cerca de la desembocadura del Río Grijalva-Usumacinta.....	43
Tabla 8.2. Concentraciones de sólidos suspendidos (gr/l) correspondientes a un valor de retrodispersión (dB) (backscatter).....	44
Tabla 8.3. Promedio de las concentraciones y descargas de sólidos suspendidos estimados para el Río Grijalva-Usumacinta, para los tiempos de registro durante octubre 2010, septiembre y noviembre de 2011. ....	52
Tabla 8.4. Contenido de materia orgánica (M.O.) e inorgánica (M. I.) en los sedimentos en suspensión del Río Grijalva – Usumacinta.....	53
Tabla 8.5. Granulometría de los sedimentos en suspensión de Río Grijalva- Usumacinta. ....	54
Tabla 8.6. Parámetros físicos para la determinación de las velocidades críticas promediadas en la profundidad para suspensión $u_{cr,s}$ . ....	55

## **RESUMEN**

Mediante un Perfilador Acústico de Corriente de efecto Doppler (ADCP) se efectuaron registros de velocidad, caudal y retrodispersión; medidos a lo largo de un ciclo completo de marea en los meses de octubre de 2010, septiembre y noviembre de 2011 en la porción del cauce cerca de la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta. Durante el monitoreo de septiembre de 2011, se midieron las concentraciones de sólidos suspendidos (CSS) de muestras de agua colectadas. Se obtuvo un modelo para estimar la CSS con los valores de retrodispersión (Bs) por medio de un análisis estadístico de regresión lineal ( $\text{Log}_{10}\text{CSS} = -5.8053 + 0.0497 * \text{Bs}$ ). Las concentraciones estimadas de sólidos en suspensión fueron en promedio de 0.13 gr/l. Las magnitudes de la corriente cerca de la desembocadura están gobernadas por la marea y el régimen de precipitación. Para el tercer cuatrimestre del año (septiembre a diciembre) el caudal medio del río Grijalva-Usumacinta fue de 5136 m<sup>3</sup>/año, con una carga de sedimento de 214.1 a 1467.2 miles de m<sup>3</sup>/mes. Dicho sedimento son limos y arcillas compuestos de materia inorgánica principalmente de origen terrígeno. Mediante perfiles de parámetros físico de salinidad, temperatura y densidad, esta último expresada en términos de sigma-t, se identificó la ubicación de la cuña salina que se produce por la interacción del agua del río con el mar, donde debido a esta interacción se genera una barra de desembocadura.

## **ABSTRACT**

Using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), records of speed, flow and backscatter were made; measured along a complete tidal cycle in the months of October 2010, September and November 2011 in the portion of the channel near the mouth of the Grijalva-Usumacinta River. During the September 2011 monitoring, the suspended solids (CSS) levels of the water samples collected were measured. A model was obtained to estimate the CSS with the backscatter (Bs) values by means of a statistical linear regression analysis ( $\text{Log}_{10}\text{CSS} = -5.8053 + 0.0497 * \text{Bs}$ ). The estimated concentrations of suspended solids averaged 0.13 g/l. The magnitudes of the current near the mouth are dominated by the tide and the precipitation regime. For the third quarter of the year, the average flow of the Grijalva-Usumacinta River was 5136 m<sup>3</sup>/year, with a sediment load of 214.1 to 1467.2 miles of m<sup>3</sup>/month. These sediments are silt and clays composed of

inorganic material mainly of terrigenous origin. With profiles of physical parameters of salinity, temperature and density, this last expression in terms of sigma-t, was identified the location of the saline wedge that is produced by the interaction of the water of the river with the sea, where due to this interaction it is generated a river mouth bar.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la desembocadura de los ríos se pueden encontrar diversos ambientes sedimentarios debido a la interacción de la corriente fluvial con el mar, por ejemplo, estuarios, deltas, playas y barras, que dependen de la intensidad de los procesos mecánicos, de las características y de la cantidad de sedimentos. En estos ambientes sedimentarios de transición, se generan hábitats para diversas especies, muchas adaptadas exclusivamente para ciertas condiciones presentes en estos ambientes. La desembocadura de los ríos son ambientes muy dinámicos y de baja resiliencia, por lo que cualquier modificación en sus factores puede cambiarlos por completo. Son ambientes muy estudiados por sus características biológicas, químicas, físicas, geológicas y por su importancia socioeconómica.

En México uno de los sistemas hídricos más importantes es el del río Grijalva-Usumacinta, el cual contiene a los dos ríos más caudalosos de este país, lo que hace necesario conocer la cantidad de sedimentos transportados por su cauce, ya que estos generan diversos ambientes sedimentarios de transición; por ejemplo, su delta en el que predomina el ecosistema de pantano, crea nichos ecológicos importantes, especialmente para especies de aves migratorias.

En los ambientes sedimentarios de transición; como su nombre lo indica, los sedimentos son la materia prima; de ahí la importancia de caracterizar la dinámica sedimentaria (procedencia, transporte, deposición, erosión y granulometría).

En cuestión del transporte de sedimentos, los procesos físicos relacionados principalmente con las diferencias en las velocidades pueden generar un flujo turbulento que causa el movimiento y transporte de las partículas de sedimento del lecho mediante rodamiento, saltación y resuspensión. La resuspensión es el mecanismo mediante el cual el sedimento de menor tamaño (arenas, limos y arcillas) es reincorporado a la columna de agua, y es en gran medida quien determina la concentración de material en suspensión y por lo tanto la cantidad de sedimento transportado por los ríos.

Existen diversas maneras para determinar la concentración de sólidos suspendidos y la cantidad de sedimentos transportados; por ejemplo, coleccionar muestras de agua y medir las concentraciones de sólidos en suspensión, asociado a realizar la batimetría del río para conocer el área de la sección transversal y, junto con mediciones de la velocidad de

las corrientes, calcular su caudal. Otras más recientes, en las que se emplea los avances tecnológicos para tratar de reducir el esfuerzo en los muestreos e incrementar la precisión de los datos, es el empleo de sensores de retrodispersión óptica (OBS por sus siglas en inglés optical backscattering sensor) que permiten determinar las concentraciones, estos equipos se usan junto con flujómetros para medir directamente el caudal. En los últimos años se han empleado perfiladores acústicos de corriente basados en el efecto Doppler (ADCP), para medir la estructura espacial de las velocidades del flujo y el caudal, pero debido a que registra en forma simultánea la intensidad del eco reflejado en las partículas suspendidas en el agua, se han usado para estimar también, las concentraciones de sólidos en suspensión.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

El material suspendido transportado por los ríos y depositados en la costa tienen gran importancia ya que son generadores de diferentes ambientes sedimentarios de transición, que son el hábitat de muchas especies; así como, proveedores de nutrientes para muchos organismos.

Cuantificar el volumen de sedimentos descargados contribuye a caracterizar la hidrodinámica de las costas en los procesos de transporte, acreción o erosión de sedimentos, presentes de manera continua o temporal; así como, a la generación y conservación de numerosos ecosistemas.

Por tal razón se han elaborado métodos para determinar la concentración de sólidos suspendidos. Un método clásico para la determinación de concentraciones de sedimentos consiste en tomar periódicamente muestras de agua en un sitio para luego analizarlas en el laboratorio. Las ventajas de este método radican en que, el valor obtenido consiste en una medida directa de la magnitud buscada y que como producto secundario se puede conocerse la granulometría de los sedimentos de la zona. Las desventajas de esta metodología radican en que se requiere la presencia de personal en el lugar para la extracción de las muestras y que el tiempo que transcurre entre la toma de una muestra y otra hace imposible captar la dinámica de varios de los procesos de interés de pequeña y mediana escala; así como la toma de muestras en condiciones extremas (Bellón *et al.*, 2010).

Esta estimación tiene mayor incertidumbre, ya que los valores obtenidos se interpolan o extrapolan a todo el cauce, esto con respecto a otras técnicas en las cuales se emplean equipos de medición más sofisticados y de mayor precisión.

Otro de los métodos utilizados consiste en el monitoreo mediante sensores ópticos, en particular sensores que utilizan la retrodispersión (Backscatter) óptica (OBSs). Esta técnica permite obtener series continuas de datos y además no es intrusiva, por lo que no interfiere dentro de los procesos que se desean medir. Sin embargo, las medidas de estos sensores son particularmente afectadas por condiciones de alta turbidez y por desechos orgánicos (Hamilton *et al.*, 1998).

Recientemente se ha generalizado el uso de perfiladores de corriente acústicos, conocidos comúnmente como ADCP's por sus siglas en inglés, para medir perfiles de

velocidades de corriente en cuerpos de agua y batimetría del cauce. Algunos instrumentos aparte de medir estas variables, estiman la retrodispersión acústica (Backscatter) a partir de los registros de intensidad acústica, por cuantificación de los procesos de atenuación y dispersión producidos por las partículas suspendidas, salinidad y temperatura. Este valor de retrodispersión puede ser usado para estimar la concentración de sólidos suspendidos (CSS) a través de una relación estadística. Esta técnica comparte varias de las ventajas y desventajas de la retrodispersión óptica. Sin embargo, es menos sensible a los efectos de la contaminación biológica y turbidez, un factor importante para determinados ambientes donde estos efectos están altamente presentes como lo es la región del río Grijalva.

La región de la desembocadura del río Grijalva actualmente presenta problemas de erosión costera, lo que causa no solo la pérdida de playa sino además de zonas de manglar y otros hábitats que sirven como hogar o zonas de reproducción de varias especies, lo que ha generado el interés de investigar los procesos costeros de la región, para proponer medidas de mitigación para la conservación.

Es por este motivo el interés de generar una caracterización de los procesos que genera la hidrodinámica costera de la región de la desembocadura del río Grijalva, y uno de dichos procesos es el transporte de sedimentos suspendidos por el cauce del río que son vertidos a la costa. Por esto la importancia de generar, mediante registros acústicos y relaciones estadísticas, estimaciones de las concentraciones de sólidos suspendidos, transportados por el río Grijalva.

### **3. ANTECEDENTES**

Muñoz-Salinas *et al.* (2016) usaron un sistema de pulsos estimulados fotoluminiscentemente (PPSL) para estudiar la cantidad de sedimentos en la columna de agua y la edad de los sedimentos depositados y concluyeron que la mayor cantidad de sedimentos se transporta durante las tormentas invernales. Muñoz Salinas y Castillo (2015) evaluaron la respuesta del caudal y de la carga de sedimentos de los ríos Grijalva – Usumacinta en relación con ENSO, para esto usaron los datos reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de 1950 a 2006 en cuatro estaciones de aforo a lo largo de los ríos. Sus resultados muestran que cuando hay Niño o Niña, la descarga de agua aumenta notablemente. Durante La Niña, la descarga es mayor que durante El Niño. Estos autores reportan que la cuenca del sistema es de  $\sim 112,000 \text{ km}^2$  con una descarga anual promedio de agua de  $\sim 2,678 \text{ m}^3/\text{s}$  y una descarga promedio de sedimentos es de  $150.25 \text{ Tn}/\text{km}^2 \text{ año}$

Por otro lado, en un estudio de “Potamología en el Bajo Grijalva” para el Programa de Modernización del Manejo del Agua (PROMMA), elaborado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en colaboración con la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR, CONAGUA), realizado en 1999 se propusieron tres sitios pilotos en México, uno de ellos la bifurcación de los ríos Mezcalapa-Samaria-Carrizal en la región del bajo Grijalva, para el monitoreo del transporte de sedimentos (por arrastre y suspensión) mediante colectores de sedimentos en la columna de agua y fondo. Los resultados reportaron que el Río Mezcalapa transporta sedimentos en suspensión con volúmenes máximos por arriba de los  $5000 \text{ m}^3/\text{día}$  contenidos en un caudal aproximado de  $1300 \text{ m}^3/\text{s}$  y volúmenes mínimos de sedimentos en suspensión de  $200 \text{ m}^3/\text{día}$  contenidos en un caudal de  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  aproximadamente, con una tendencia exponencial en las concentraciones de acuerdo al caudal del río. También mencionaron que las concentraciones cerca del fondo fueron mayores y que las concentraciones varían de acuerdo al régimen temporal de las precipitaciones (estiaje-lluvias) (Peters, 2005).

En cuanto al uso de ADCP para la medición de descargas de ríos y de sedimentos, esta es una técnica reciente, pero de amplio uso, basta con mencionar los trabajos de Kimiaghali *et al.* (2016), Cussioli *et al.* (2015), Weiss *et al.* (2015), Tiron *et al.* (2014), Islam *et al.* (2013), Defendi *et al.* (2010), Gartner (2004), entre otros publicados en este ramo.



Cabe mencionar que el estudio resumido en esta tesis, derivó de los resultados y recomendaciones de una evaluación previa hecha por OMM en 1998 donde se expuso que, aunque se tiene una red de medición de transporte de sedimentos por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), las mediciones y los bancos de datos son deficientes (Peters, 2004).

Lo anterior se puede considerar como un antecedente; sin embargo, como se ha dicho no hay información respecto al transporte y descarga de material en suspensión en la parte final del sistema Grijalva-Usumacinta.

## **4. MARCO TEÓRICO**

En la actualidad, en varios sitios del mundo se han realizado estudios empleando ADCP's para estimar la cantidad de sólidos sedimentables o microorganismos contenidos en una columna de agua a través de las propiedades acústicas de las partículas.

Bellón *et al.* (2010), realizaron un estudio en el cual determinaron los sólidos en suspensión con perfiladores de corriente acústicos en las costas de Montevideo, Uruguay. En dicho estudio anclaron un ADCP de 1200 kHz en la costa. La retrodispersión registrada por el instrumento fue empleada para estimar, en conjunto con la toma de diversas muestras de agua, la relación entre la intensidad acústica y la concentración de sólidos suspendidos, dicha relación se obtuvo a partir de la ecuación del sonar, la cual fue posteriormente validada por un grupo independiente de muestras, que resultó en errores inferiores al 10% y mostró que el método aplicado es adecuado para ser empleado en este entorno.

Salas de León *et al.* (2005), realizaron la estimación de la biomasa zooplanctónica en las zonas costeras mediante un perfilador acústico de alta frecuencia (5.6 MHz). El experimento fue elaborado a partir de seis estaciones en la Laguna de la Ría, ubicada en la parte este de la Península de Yucatán, además de las mediciones con el perfilador acústico, tomaron muestras de zooplancton con redes cónicas de 200 y 500  $\mu\text{m}$ , la biomasa la estimaron como una relación de la intensidad de la onda acústica que obtuvieron aplicando el principio de la conservación de la energía. El resultado fue una relación logarítmica entre la intensidad acústica y la biomasa zooplanctónica, el modelo obtenido fue útil para la estimación de la biomasa del plancton con perfiladores acústicos de alta frecuencia en un ambiente de aguas poco profundas con poca materia orgánica o sedimento en suspensión.

Kim y Voulgaris (2001) estimaron la concentración de sólidos suspendidos en ambientes estuarinos, usando la retrodispersión (backscatter) registrada con un ADCP. Los registros que obtuvieron con el perfilado acústico (ADCP, RDI 1200 kHz) en conjunto con datos de sedimentos en suspensión obtenidos con un sensor óptico de retorno (OBS), los usaron para hacer la calibración de una versión simplificada de la ecuación del sonar y para obtener un modelo estadístico.

#### **4.1 Modelo para el cálculo de sólidos suspendidos**

La cantidad de sólidos suspendidos se pueden obtener a partir de los valores de retrodispersión (backscatter) registrados por el perfilador acústico (ADCP) a partir de un modelo teórico de la forma:

$$\log_{10}y = b_0 + b_1x + Er$$

Donde:

$y$  = variable dependiente

$b_0$  = es el intercepto

$b_1$  = pendiente de la recta

$x$  = variable independiente

$Er$  = Error

El modelo se puede expresar de la siguiente manera para que sea más claro en términos de la concentración de sólidos suspendidos y una variable obtenida a partir de los registros acústicos con el ADCP:

$$\log_{10}CSS = b_0 + b_1Bs$$

Donde:

$CSS$  = Concentración de Sólidos Suspendidos

$Bs$  = Retrodispersión (Backscatter)

$b_0$  y  $b_1$  son la intersección y pendiente de la línea recta respectivamente, que se obtiene a través de una regresión lineal con los valores medidos de retrodispersión y el logaritmo base 10 de las concentraciones de sólidos suspendidos medidos.

El término  $Bs$  es obtenido a partir del nivel de eco registrado por el transductor y la pérdida por transmisión de dos vías, éste está definido por la siguiente ecuación (Ghaffari *et al.*, 2011):

$$Bs = RL + 2TL$$

$RL$  se define como:

$$RL = SL - 2TL + TS$$

Donde:

$RL$  = Nivel de reverberación

$SL$  = Nivel de sonido de la fuente

$2TL$  = atenuación

$TS$  = Fuerza de Blanco

En términos de valores del ADCP la reverberación y atenuación pueden ser expresados como:

$$RL = Kc(I - Ir)$$

Donde  $I$  es la intensidad de la onda acústica emitida por el ADCP,  $Ir$  es la intensidad del nivel de referencia y el  $Kc$  factor de conversión para transformar del número de impactos (counts) a decibeles (dB) y la atenuación  $2TL$  está dada por:

$$2TL = 20\log_{10}(R) + 2\alpha R$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción y  $R$  es el rango de volumen sondeado y está definido por:

$$R = r + \frac{D}{4}$$

Donde:

$r$  = la distancia oblicua de la cara del transductor al centro del bin

$D$  = el diámetro del bin

Para el cálculo del coeficiente de absorción se usa la siguiente expresión (Erbe, 2011).

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0.56} + 0.52 \cdot \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{S}{35}\right) \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-h/6} + 4.9 \times 10^{-4} f^2 e^{-(T/7+h/17)}$$

Donde:

$f$  = Frecuencia aplicada [kHz]

$T$  = Temperatura del agua [°C]

$S$  = Salinidad [ups]

$h$  = Profundidad [m]

$f_1$  y  $f_2$  son la absorción molecular (obtenidos químicamente), dado por dos componentes principales, el ácido bórico y el sulfato de magnesio respectivamente, los cuales están dados por:

$$f_1 = 0.78(S/35)^{1/2} e^{T/26}$$

$$f_2 = 0.42e^{T/17}$$

#### **4.2 Suspensión de los sedimentos del fondo en una corriente**

La teoría y metodología descrita en esta tesis, para la determinación de la suspensión de sedimentos, está basada en los trabajos realizados por Van Rijn integrados en su trabajo "Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, and Coastal Seas de 1993 (Rijn, 1993).

El movimiento de las partículas ocurre cuando la fuerza de fluido instantáneo es mayor que la fuerza de resistencia instantánea, las cuales están relacionadas con el peso de la partícula sumergida y la fricción. Las fuerzas cohesivas son importantes cuando el contenido de arcillas y limos en el lecho del cauce es de consideración. Las fuerzas motrices son fuertemente relacionadas con las velocidades cercanas al fondo. En condiciones de flujos turbulentos las velocidades fluctúan en espacio y tiempo, aunado a la aleatoriedad del tamaño de las partículas, la pendiente y la posición hacen que la iniciación de movimiento no sea simplemente un fenómeno determinista sino también un proceso estocástico.

### **Propiedades de los fluidos**

Todos los fluidos tienen características medibles como son densidad, viscosidad, compresibilidad, capilaridad, tensión superficial. La densidad del agua dulce varía con la temperatura, pero para los fines de este trabajo se tomará el valor de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Algunas propiedades son combinación de otras como, la viscosidad cinemática que involucra la viscosidad dinámica y la densidad. La viscosidad cinemática está dada por.

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

Donde:

$v$  = coeficiente de viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\eta$  = coeficiente de viscosidad dinámica ( $\text{Ns/m}^2$ )

$\rho$  = densidad del fluido ( $\text{Kg/m}^3$ )

Una aproximación del valor de viscosidad cinemática está dada por la siguiente expresión la cual está en función de la temperatura del fluido ( $T$ ):

$$v = [1.14 - 0.031(T - 15) + 0.00068(T - 15)^2]10^{-6}$$

### **Propiedades de los sedimentos**

Los sedimentos son fragmentos minerales, principalmente formados por desintegración física y química de las rocas, el tamaño puede ser desde bloques hasta coloides, con formas redondeadas o angulares. También varían en densidad específica y composición mineralógica, los minerales predominantes son de cuarzo y arcillas, estas últimas forman estructuras laminares que pueden cambiar fácilmente (floculación) bajo la influencia de fuerzas electroestáticas (fuerzas cohesivas). Consecuentemente esto hace una diferencia fundamental en el comportamiento sedimentario entre arenas y arcillas. Algunas propiedades de los sedimentos son: densidad, forma, tamaño, velocidad de caída.

La densidad de los sedimentos de cuarzo y minerales arcillosos (de origen terrígeno) es aproximadamente igual a 2560 Kg/m<sup>3</sup>, la relación de la densidad del sedimento y la densidad del fluido se conoce como densidad específica del sedimento ( $s = \rho_s/\rho$ ).

Generalmente los sedimentos se clasifican por su tamaño en gravas, arenas, limos y arcillas. La Sociedad Geofísica Americana (American Geophysical Union) estableció una escala de tamaño de grano basada en potencias de 2 mm, semilogarítmica, mediante un parámetro phi ( $\phi$ ) definido como  $\phi = -\log_2 d$ , donde  $d$  es el diámetro de la partícula en milímetros. La tabla 4.1 presenta la escala de tamaño de Friedman y Sanders (1978) (modificada de Wentworth, 1922).

*Tabla 4.1. Escala de tamaño de partícula de sedimento de Friedman y Sanders (1978).*

Udden-Wentworth (1922)		phi	mm	Friedman y Sanders (1978)	
Adoquines	}	-11	2048	Muy grande	} Peñasco
		-10	1024	Grande	
		-9	512	Mediano	
		-8	256	Pequeño	
		-7	128	Grande	
Guijarros	}	-6	64	Pequeño	} Adoquín
		-5	32	Muy grueso	
		-4	16	Grueso	
		-3	8	Mediano	
Arena	}	-2	4	Fino	} Guijarro
		-1	2	Muy fino	
		0	1	Muy grueso	
		1	500 $\mu$	Grueso	
		2	250 $\mu$	Mediano	
Arcilla	}	3	125 $\mu$	Fino	} Arena
		4	62 $\mu$	Muy fino	
		5	31 $\mu$	Muy grueso	
		6	16 $\mu$	Grueso	
		7	8 $\mu$	Mediano	
Arcilla	}	8	4 $\mu$	Fino	} Limo
		9	2 $\mu$	Muy fino	
				Arcilla	

(Modificada de Wentworth, 1922).

El tamaño de grano puede ser usado como indicador de las condiciones de energía. Sedimentos finos se relacionan a condiciones de baja energía cerca de bancos de ríos o planicies de marea, sedimentos gruesos se encuentran en condiciones de alta energía cerca de barras rompeolas, a lo largo de la costa y en canales más profundos de ríos y estuarios. Las partículas más gruesas son transportadas como carga de fondo y partículas finas como carga en suspensión.

La relación entre el tamaño de grano, clasificación y condiciones hidráulicas son usadas para distinguir diferentes ambientes sedimentarios, como los dominados por oleaje, corriente de erosión o acreción y cambios entre ellos.

La velocidad final de caída de una partícula esférica en un fluido ( $W_s$ ), es la velocidad cuando la fuerza de arrastre del fluido sobre la partícula está en equilibrio con la fuerza de gravedad, teniendo:

$$W_s = \left[ \frac{4(s-1)gd}{3C_D} \right]^{1/2}$$

Donde:

$d$  = diámetro de la esfera (m)

$s$  = densidad específica

$C_D$  = coeficiente de arrastre

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

El coeficiente de arrastre es una función del Número de Reynolds ( $Re=W_s d/\nu$ ) y del factor de forma, generalmente determinado por el factor de forma de Corey como:

$$SF = c/(ab)^{1/2}$$

Donde:

$a$  = longitud del eje mayor de la partícula

$b$  = longitud del eje intermedio de la partícula

$c$  = longitud del eje menor de la partícula

Para el caso de una partícula no esférica, lo cual se puede aplicar a una partícula de sedimento debido a la irregularidad de su forma, los efectos de la forma aumentan en partículas relativamente grandes ( $< 100 \mu m$ ) dado a que se asemejan menos a una esfera que las partículas pequeñas.



Por lo tanto, la velocidad de caída para una partícula no esférica o de sedimento puede ser determinada según el rango de tamaño por las siguientes formulas:

$$W_s = \left[ \frac{4(s-1)gd}{3C_D} \right]^{1/2} \quad \text{para } 1 < d \leq 100 \mu\text{m}$$

$$W_s = \frac{10v}{d} \left[ \left( 1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{v^2} \right) - 1 \right] \quad \text{para } 100 < d < 1000 \mu\text{m}$$

$$W_s = 1.1[(s-1)gd]^{1/2} \quad \text{para } d \geq 1000 \mu\text{m}$$

Donde:

$d$  = Tamaño medio de la partícula de sedimento (m)

$s$  = densidad específica

$\nu$  = coeficiente de viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

### **Iniciación de suspensión en corrientes**

Debido al incremento de la velocidad de cizalle con el fondo ( $u_*$ ) las partículas se mueven a lo largo del fondo. Cuando esta velocidad es mayor que la velocidad de caída el sedimento puede entrar en suspensión (Bagnold, 1966).

Por lo tanto, el criterio para la iniciación de la suspensión de los sedimentos está dado por:

$$\frac{u_{*,cr} s}{W_s} = 1$$

Que puede ser expresado como:

$$\theta_{cr s} = \frac{(u_{*,cr s})^2}{(s-1)gd_{50}} = \frac{(W_s)^2}{(s-1)gd_{50}}$$

Donde;

$\theta_{cr s}$  = parámetro adimensional de movilidad crítica de la partícula para la suspensión de sedimentos

$u_{*,cr s}$  = velocidad de cizalle crítica con el fondo para la iniciación de la suspensión (m/s)

$W_s$  = velocidad de caída de la partícula de sedimento (m/s)

$d_{50}$  = tamaño medio de la partícula de sedimento (m)

$g$  = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$\rho_s$  = densidad del sedimento (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho$  = densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

$\theta_{cr s}$  ha sido modificada de acuerdo a resultados experimentales, en función del valor del parámetro de partícula  $D_*$  el cual refleja la influencia de la gravedad, densidad y viscosidad cinemática en la siguiente relación:

$$D_* = \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

Con lo anterior las expresiones para calcular el parámetro de movilidad crítica de la partícula para la suspensión de sedimentos son:

$$\theta_{cr s} = \frac{16}{D_*} \frac{(W_s)^2}{(s-1)gd_{50}} \quad \text{para } 1 < D_* \leq 10$$

$$\theta_{cr s} = 0.16 \frac{(W_s)^2}{(s-1)gd_{50}} \quad \text{para } D_* > 10$$

### **Velocidad crítica de suspensión promediada en profundidad**

La velocidad crítica cerca del fondo está relacionada con el diámetro de la partícula de sedimento. Como la velocidad cerca del fondo no está bien definida, es preferible usar la velocidad crítica promediada en la profundidad ( $\bar{u}_{cr,s}$ ) como parámetro característico.

La velocidad crítica de suspensión promediada en la profundidad puede ser derivada del esfuerzo de cizalle con el fondo usando la ecuación de Chézy o coeficiente de Chézy, que está dado por:

$$\bar{u}_{cr,s} = \left[ \frac{C^2 \tau_{b,cr,s}}{\rho g} \right]^{1/2}$$

Con

$$C = 18 \log \left[ \frac{12h}{3d_{90} + 3.3 v/u_*} \right]$$

$$\tau_{b,cr,s} = 0.33(\rho_s - \rho)gd_{50}$$

Donde:

$C$  = Coeficiente de Chézy ( $m^{1/2}/s$ )

$h$  = profundidad (m)

$v$  = viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

$u_*$  = velocidad de cizalle con el fondo (m/s)

$\tau_{b,cr,s}$  = esfuerzo de cizalle con el fondo ( $N/m^2$ )

$d_{90}$  = tamaño representativo de la fracción gruesa superficial (m)

$d_{50}$  = tamaño medio de la partícula sedimentaria (m)

Cuando el fondo consiste principalmente de limos y arcillas (fondo lodoso) es importante considerar el efecto de las fuerzas cohesivas, las cuales producen un incremento en la resistencia del suelo a ser erosionado. Este efecto se cuantifica y considera mediante el producto del esfuerzo de cizalle con el fondo  $\tau_{b,cr,s}$  por un factor de escala que considera el porcentaje de material fino menor a 50  $\mu\text{m}$ , mediante la siguiente expresión:

$$\tau_{b,cr,s} = (p_s)^{1/2}$$

En la ecuación anterior  $p_s$  representa el porcentaje de sedimentos finos menores a 50  $\mu\text{m}$ .

### **Teorías sobre el movimiento transversal en una corriente fluvial**

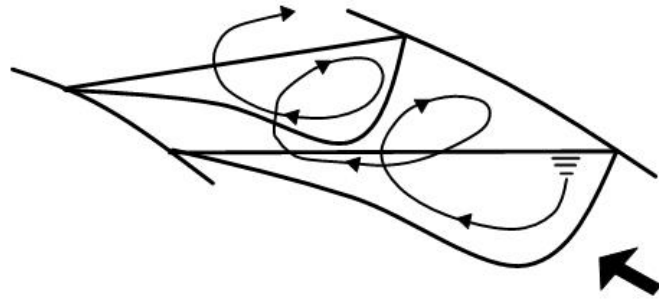
Existen un conjunto de teorías que describen las maneras en que se puede generar una corriente helicoidal transversal en un cauce generada por meandros.

#### *Perturbaciones*

Los efectos producidos por los diferentes materiales que constituyen los taludes y el fondo de un canal, la presencia de tributarios (Sánchez, 2007), la existencia de sobrecarga de sedimentos los cuales pueden ser retenidos por algún obstáculo y producir una simetría en el flujo (Griggs, 1906), o las oscilaciones trasversales de la superficie que se propagan hacia el fondo (Hjulstrom, 1957) son perturbaciones que en una corriente recta se propagan aguas abajo causando oscilaciones del flujo las cuales inducen la formación de meandros.

#### *La corriente helicoidal*

El flujo secundario o trasversal definido por Einstein y Li (1958), es la corriente que posee una rotación alrededor de un eje paralelo a la corriente principal y se conoce como un flujo helicoidal (Garde y Ranga, 1985). El flujo helicoidal en el cauce de un río tiene una trayectoria trasversal en el fondo, que va, de la margen cóncava hacia la margen convexa en un meandro, esta corriente es complementada por un flujo en sentido opuesto en la superficie. La circulación no es perpendicular a la corriente principal, dado que, posee una componente en dirección aguas abajo que varía con la velocidad de la corriente (figura 4.1).



*Figura 4.1. Flujo helicoidal presente en meandros.*

La principal acción de un flujo helicoidal consiste en la remoción de sedimento de la margen cóncava a la margen convexa intensificando la tendencia a formar meandros. Las corrientes helicoidales influyen en la distribución y deposición de sedimentos en suspensión (Garde y Ranga, 1985).

Las corrientes secundarias pueden presentarse aún en cauces rectos con o sin movimiento de sedimentos. Aún en una corriente con márgenes rectas, la línea de máxima velocidad no es recta, sino se mueve de una celda hacia otra. Si las celdas se ubican en las márgenes opuestas del cauce, entonces resulta predecible que se pueda desarrollar una sinuosidad en el cauce recto (Sparks, 1986).

#### *Teoría de Thomson*

La teoría propuesta por James Thomson (1876), considera como condición inicial una trayectoria recta de un cauce que por alguna perturbación ha modificado su trayectoria, modificación de las líneas de corriente recorriendo trayectorias curvas que genera una fuerza centrífuga. Esta fuerza centrífuga produce una pendiente transversal en la superficie, en donde, actúan principalmente dos fuerzas: el peso que actúan en dirección vertical y la fuerza centrífuga que actúa perpendicular al peso. El efecto de estas fuerzas representa la causa principal de la trayectoria trasversal del flujo helicoidal que erosiona la margen cóncava acarreado el material hacia la margen convexa (Leliavsky, 1955) (figura 4.2).

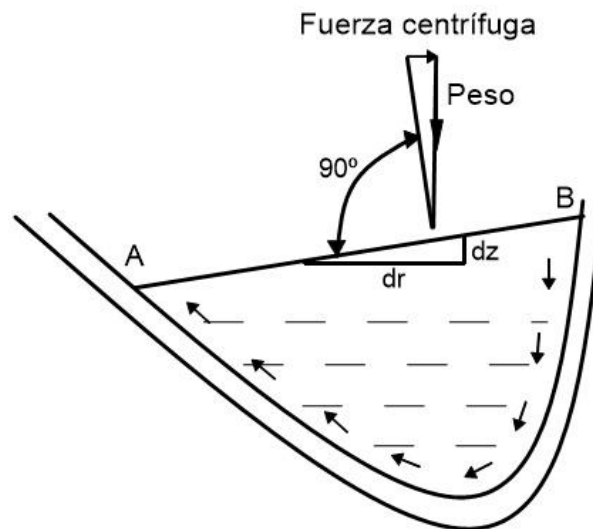


Figura 4.2. Representación gráfica de los efectos producidos por la fuerza centrífuga en una corriente con trayectoria curva.

#### Rotación de la Tierra

La fuerza de Coriolis es la fuerza aparente transversal a la trayectoria que experimenta un cuerpo en movimiento sobre la superficie de la Tierra y representa la resistencia al movimiento rotacional del planeta. De acuerdo con Neu (1967), la magnitud de esta fuerza es directamente proporcional a la velocidad del objeto en movimiento, siendo mayor en la proximidad de los polos y decreciente conforme se aproxima hacia el ecuador.

La aceleración debida al efecto de Coriolis, el cual actúa perpendicularmente al movimiento de un objeto o una partícula de materia moviéndose sobre la Tierra, está dada por la expresión (Neu, 1967):

$$a = 2\omega u \cos \varphi$$

donde;

$\omega$  = velocidad angular de rotación de la Tierra

$a$  = aceleración de Coriolis en el plano horizontal

$\varphi$  = latitud geográfica.

$u$  = velocidad horizontal de la partícula de agua

En 1938 Wittman y Boss realizaron estudios de la dinámica de flujos en curvas, donde demostraron que, en los canales curvos, se presentaba una circulación transversal iniciada por la diferencia entre la fuerza centrífuga en las capas superior e inferior del flujo, causando cambios en el fondo y las márgenes. Considerando que la distribución de la velocidad longitudinal es parabólica y que existe una distribución lineal de la presión en la vertical, en la superficie la fuerza de Coriolis por unidad de masa ( $2\omega u$ ) es mayor que la fuerza debida a la presión hidrostática. Contrario a lo que sucede cerca del fondo donde la fuerza ejercida por la presión es mayor que la fuerza de Coriolis, ya que cerca del fondo la velocidad del flujo es mínima. Esta diferencia de fuerzas genera un desequilibrio y a la vez una corriente transversal.

## 5. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza cerca a la desembocadura del Río Grijalva entre  $92^{\circ}41'00''$  y  $92^{\circ}40'34''$  de latitud norte y  $18^{\circ}33'45''$  y  $18^{\circ}34'11''$  de longitud oeste, en el tramo del río posterior a la unión de todos los cauces secundarios y anterior a la bifurcación del canal del cauce principal, esto con la finalidad de captar el caudal total y por ende la cantidad de sólidos suspendidos totales que se vierten a la costa en un tiempo determinado (Figura 5.1).

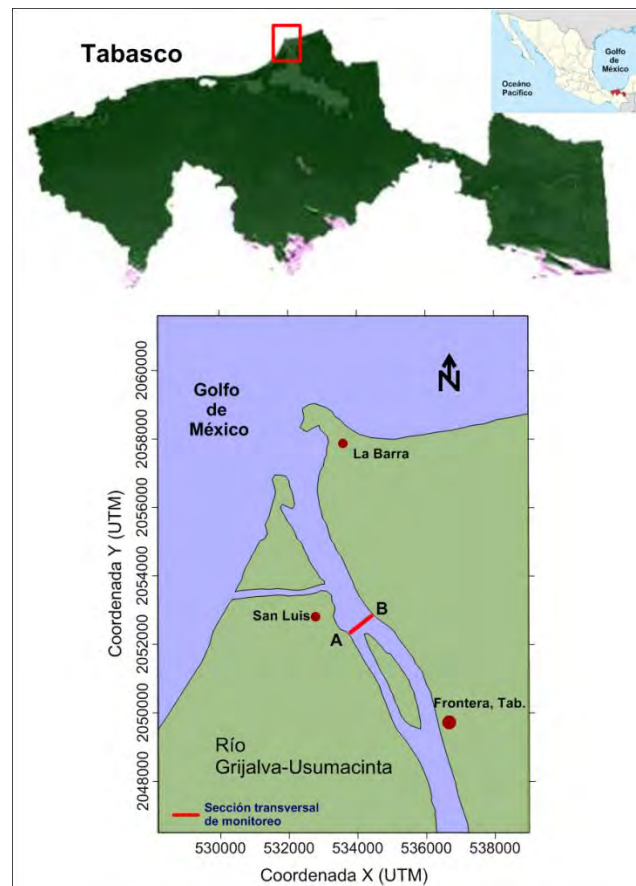


Figura 5.1. Localización del área de estudio, cercano a la desembocadura del Río Grijalva.

### 5.1 Características hidrológicas del área de estudio

La descarga en la desembocadura del río Grijalva es la acumulación de muchos eventos y procesos en las zonas ubicadas aguas arriba, que abarca el área que se conoce con el nombre de Región Hidrológica “Grijalva-Usumacinta” y que tiene las siguientes características:



### **Región hidrológica "Grijalva-Usumacinta"**

Esta región hidrológica tiene categoría internacional, ya que se desarrolla en territorio mexicano y guatemalteco. Sus límites dentro de México quedan definidos al este por el río Suchiate, al sureste y sur por el límite político entre Chiapas y Guatemala, al noreste por el río Usumacinta, lindero natural entre Chiapas y Guatemala y, al sur y este, por el límite entre Tabasco y Guatemala.

La región se encuentra constituida por el sistema Grijalva-Usumacinta, en el que se incluyen los ríos Santa Ana (Tabasco) hacia el oeste y Palizada (Campeche) hacia el este, en la amplia zona en que el sistema desemboca en el Golfo de México.

En la porción tabasqueña de esta región hidrológica están ubicadas poblaciones relevantes como Villahermosa, Cárdenas, Comalcalco, Jalpa, Frontera, Teapa, Macuspana, Paraíso, Tenosique y otras, además comprende parte de tres cuencas dentro de Tabasco.

### **Sistemas loticos**

El Río Usumacinta es el más caudaloso del país, el río Grijalva ocupa el segundo lugar a nivel nacional; este sistema incluye innumerables afluentes de mayor o menor importancia, como los Ríos Carrizal, Mezcalapa, el sistema San Pedro-San Pablo; así como, una gran cantidad de lagunas y albuferas diseminadas por todo el territorio, que se conectan con las corrientes en época de crecida.

El volumen medio anual descargado por el sistema Grijalva-Usumacinta al Golfo de México es de 125 mil millones de metros cúbicos; esta cifra representa el 35% del escurrimiento del país.

### **Sistemas lenticos**

Se calcula que la mitad de los llanos aluviales están sumergidos en mayor o menor grado. Los pantanos son el ecosistema predominante en las riberas de este sistema, creando nichos ecológicos importantes, especialmente para especies de aves migratorias (INEGI, 2005).

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1 Objetivo General**

- Estimar la concentración de sólidos suspendidos contenidos en el cauce del río Grijalva-Usumacinta en su parte terminal a partir de la señal de retrodispersión acústica registrada con un Perfilador Acústico de Corriente de Efecto Doppler (ADCP) de 1200 kHz.

### **6.2 Objetivo Particular**

- Obtener una relación matemática entre la retrodispersión acústica (backscatter) con la concentración de sólidos suspendidos, vertidos por el cauce del río Grijalva-Usumacinta hacia la costa.
- Determinar el volumen de sólidos suspendidos vertido por el río Grijalva-Usumacinta hacia la costa.

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1 Etapa de campo - Mediciones y muestreo**

#### **Mediciones con ADCP**

Se realizaron mediciones con un perfilador acústico de efecto Doppler (ADCP) marca RDI de 1200 kHz en modo móvil sujeto al costado de una embarcación, los registros se hicieron a lo largo de una sección transversal al cauce, el monitoreo tuvo una duración de 24 horas en los meses de octubre de 2010, septiembre de 2011 y noviembre de 2011 con intervalos de aproximadamente dos horas entre mediciones.

De los registros realizados con el perfilador acústico, se obtuvieron para cada tiempo medido, datos de:

- Magnitud de la velocidad (m/s)
- Componente vectorial  $u$  y  $v$  del vector de velocidad (m/s)
- Dirección de corriente ( $^{\circ}$ )
- Profundidad del fondo (m)
- Profundidad de la celda medida (m),
- Intensidad acústica (counts)
- Retodispersión (Backscatter) (dB)
- Caudal total y parcial ( $m^3/s$ )

#### **Colecta de muestras de agua para análisis de sólidos suspendidos**

Se tomaron muestras de agua con botella tipo Van Dorn de tres litros en la misma sección, siendo distribuidas en tres sitios superficialmente, margen derecha, centro y margen izquierda, tomando tres muestras en cada sitio de acuerdo a la profundidad (somero, medio y profundo). Fueron un total de nueve muestras en cada colecta (Figura 7.1). Se realizaron dos colectas coincidentes con dos diferentes tiempos de medición con ADCP durante el monitoreo del mes de septiembre de 2011 (Tabla 7.1).

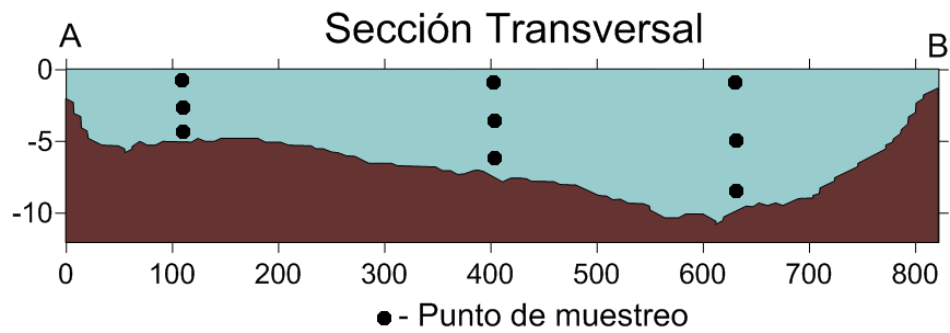


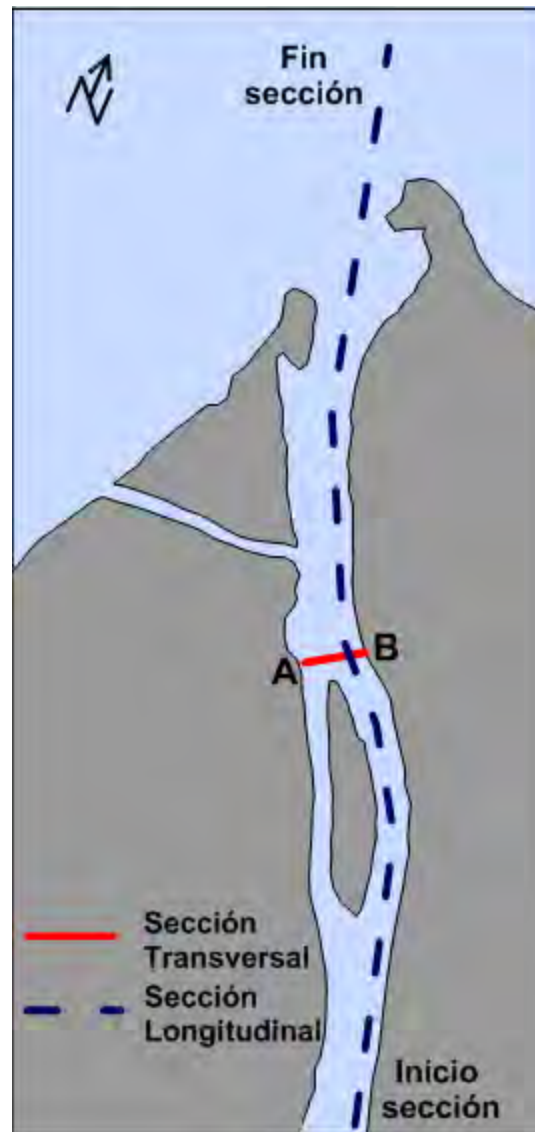
Figura 7.1. Esquema de distribución de puntos de muestreo de agua para análisis de sólidos suspendidos.

Tabla 7.1. Muestras colectadas durante septiembre de 2011. Ubicación de la muestra (x,y) en UTM

NO. DE MUESTRA	ID_MUESTRA	FECHA	HORA	PROF. DEL RÍO (m)	PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA (m)	X	Y
1	7-S	05/09/2011	10:45	8.5	1	533963	2053409
2	7-M	05/09/2011	10:45		4	533963	2053409
3	7-F	05/09/2011	10:45		8	533963	2053409
4	8-S	05/09/2011	10:52	7.2	1	533754	2053809
5	8-M	05/09/2011	10:52		3.5	533754	2053809
6	8-F	05/09/2011	10:52		6.5	533754	2053809
7	9-S	05/09/2011	10:58	4.5	1	533435	2053234
8	9-M	05/09/2011	10:58		2.5	533435	2053234
9	9-F	05/09/2011	10:58		4.5	533435	2053234
10	10-S	05/09/2011	22:03	9.5	1	533948	2053383
11	10-M	05/09/2011	22:03		4	533948	2053383
12	10-F	05/09/2011	22:03		8	533948	2053383
13	11-S	05/09/2011	22:11	7.2	1	533772	2053301
14	11-M	05/09/2011	22:11		3.5	533772	2053301
15	11-F	05/09/2011	22:11		6.5	533772	2053301
16	12-S	05/09/2011	22:19	4.8	1	533450	2053209
17	12-M	05/09/2011	22:19		2.5	533450	2053209
18	12-F	05/09/2011	22:19		4.5	533450	2053209

### Mediciones de parámetros físicos con sonda multiparamétrica

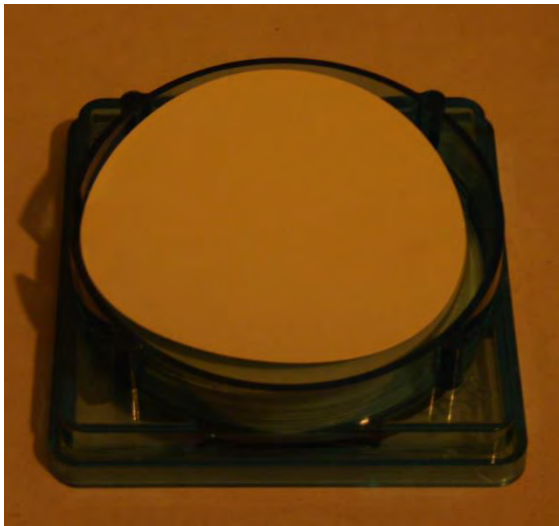
Se realizaron varios perfiles con sonda multiparamétrica a lo largo de la sección de muestreo, en ciertos intervalos de tiempo que coinciden con algunos de los registros de las mediciones con el ADCP; así como, se hicieron perfiles a lo largo de una sección longitudinal que comenzaba algunas unidades de kilómetros aguas arriba hasta la desembocadura del río (figura 7.2) en los periodos de marea alta y baja. Las mediciones se hicieron durante el monitoreo de septiembre y noviembre de 2011, los parámetros medidos fueron presión, temperatura y conductividad.



*Figura 7.2. Esquema de localización de las secciones sondeadas para parámetros físico con equipo multiparamétrico YSI.*

## **7.2 Etapa de laboratorio y gabinete - Análisis de muestras de agua y procesamiento de datos**

De las muestras de agua se cuantificó la concentración de sólidos suspendidos (CSS) en gramos por litro, mediante el método de desecación, el cual consiste en tomar un filtro de análisis de sólidos ( $0.45 \mu\text{m}$ ) (figura 7.3a), pesarlo hasta conseguir un peso constante, agitar la muestra vigorosamente y filtrar un volumen ( $V$ ) determinado de la misma, utilizando para ello un equipo de filtración al vacío (figura 7.3b).



a)



b)

*Figura 7.3. Material de filtración a) Filtros para análisis de sólidos mayores de 0.45  $\mu\text{m}$ , b) dispositivo de filtración.*

Una vez filtrada la muestra se recogió el filtro y se colocó en un crisol de porcelana. Este se secó a 105° C durante una hora. Posteriormente se dejó enfriar en el desecador y se pesó, hasta conseguir un peso constante (APHA, 1989).

El contenido en sólidos en suspensión se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\text{CSS (gr/l)} = (\text{Pm}-\text{Ps})/\text{V}$$

Donde;

Pm: peso del filtro con muestra después de evaporar el agua, en gramos.

Ps: peso del filtro antes de añadir la muestra, en gramos.

V: volumen de muestra utilizado, en litros.

A partir del sedimento obtenido de las muestras de agua, en el laboratorio se analizó la materia orgánica e inorgánica por el método de frotis en lámina, se determinó su porcentaje a través de la tabla de porcentaje de comparación visual (Rothwell, 1989). Otra

parte de la muestra fue llevada para su análisis granulométrico al Laboratorio de Analizador Láser de Partículas del Laboratorio de Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. Debido a la escasa cantidad de sedimento obtenido por muestra se tuvieron que aglomerar los sedimentos de las muestras de cada nivel de profundidad (superficie, medio y fondo).

A los datos colectados con el ADCP, se les hizo un primer post-procesamiento el cual consistió en la depuración y organización de estos, con ayuda de los software WinRiver II, Matlab 6.0 y Microsoft Excel 2007, se realizó un ajuste en el sistema de referencia, el cual consistió en rotarlo ( $23^\circ$  a  $26^\circ$  hacia el noroeste en promedio) para hacer coincidir el eje del río con el eje norte (figura 7.4) y; así, al calcular las componentes del vector de velocidad  $u$  y  $v$ , la componente  $v$  representará la dirección principal del flujo del río, para poder establecer la presencia de flujo positivo y negativo en el cauce (entrada y salida de agua), mientras que la componente  $u$  indicará los desplazamientos laterales de flujo. Se elaboraron las gráficas de la componente  $u$  y  $v$  del vector de velocidad de corriente con ayuda del programa Surfer 8.0 y se calcularon los caudales totales con el programa WinRiver II para cada tiempo de registro.

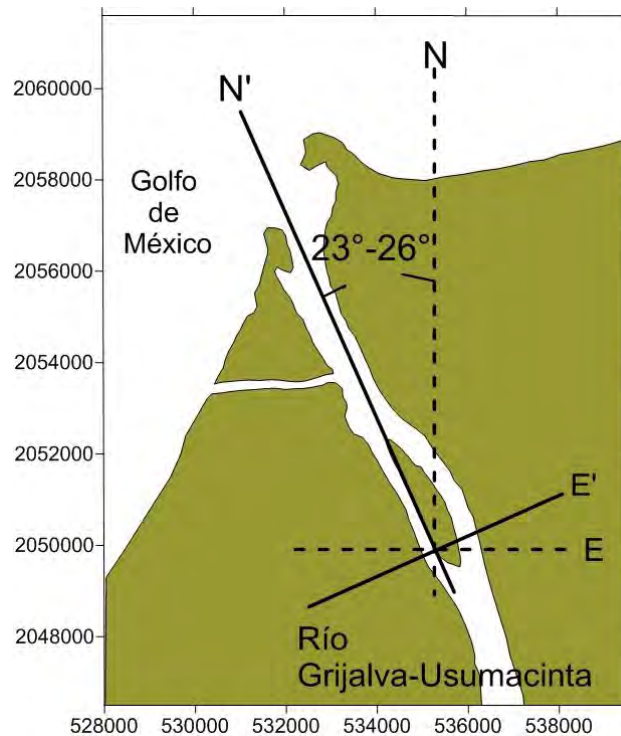


Figura 7.4. Esquema que muestra el ajuste de sistema de referencia, para la dirección de la velocidad de corriente.

De igual forma los datos de retrodispersión (backscatter) se obtuvieron con el programa WinRiver II, el cual los calcula a partir de los valores de intensidad acústica registrados mediante correcciones por atenuación y reverberación, el uso de valores característicos del ADCP y los parámetros físicos del agua presentes durante las mediciones.

Con los datos obtenidos se realizó un tratamiento estadístico para establecer el modelo de regresión entre la concentración de sólidos suspendidos y la retrodispersión con un intervalo de confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ). Una vez validado el modelo estadísticamente, se calculó la concentración de sólidos suspendidos de las mediciones realizadas en todos los monitoreos y se estimó el aporte de sedimentos de río Grijalva – Usumacinta hacia el océano.

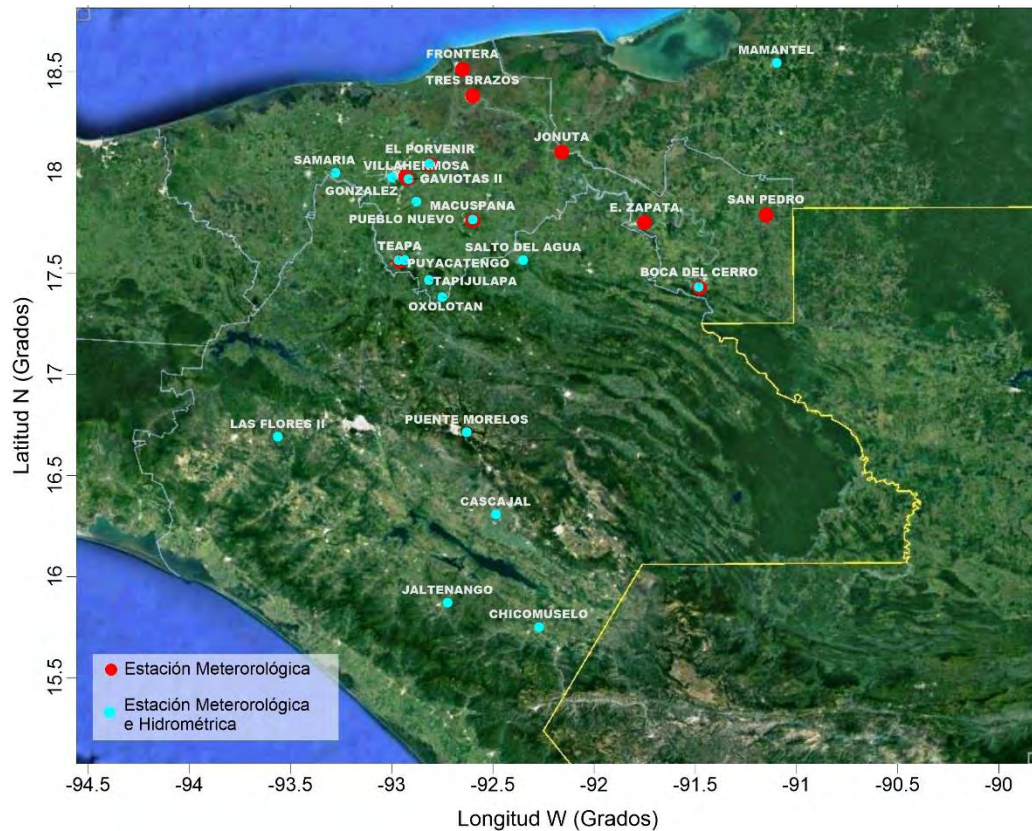
Se realizaron las gráficas de distribución de los parámetros físico-químicos de salinidad, temperatura (°C), medidos con la sonda multiparamétrica y se calculó el valor de sigma-t mediante la Ecuación de Estado (TEOS-2010) a partir de los valores de presión (dbar), temperatura (°C) y salinidad medidos.

Se analizaron los valores de las precipitaciones y gastos medidos durante los años 2010 y 2011 en los registros diarios de algunas estaciones meteorológicas e hidrométricas (Tabla 7.2) localizadas en la cuenca del río Grijalva-Usumacinta (Figura 7.5). Datos proporcionados por el Sistema Meteorológico Nacional y el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

*Tabla 7.2. Estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca del Río Grijalva-Usumacinta.*

Estaciones Meteorológicas			Estaciones Hidrométricas		
Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Estación	Longitud (°)	Latitud (°)
BOCA DEL CERRO	-91.48	17.43	GAVIOTAS	-92.917	17.967
EL PORVENIR	-92.81	18.04	SAMARIA	-93.278	17.998
FRONTERA	-92.65	18.51	PUEBLO NUEVO	-92.879	17.854
GAVIOTAS II	-92.92	17.97	BOCA DEL CERRO	-91.483	17.433
MACUSPANA	-92.6	17.76	PUYACATENGO	-92.938	17.567
SAN PEDRO	-91.15	17.79	TEAPA	-92.967	17.567
TEAPA	-92.96	17.56	SALTO DEL AGUA	-92.350	17.567
VILLAHERMOSA	-92.93	17.98	MACUSPANA	-92.600	17.767
EMILIANO ZAPATA	-91.75	17.75	PUENTE MORELOS	-92.629	16.714
JONUTA	-92.16	18.1	GONZALEZ	-93.000	17.975
TRES BRAZOS	-92.6	18.38	LAS FLORES II	-93.563	16.692
			TAPIJULAPA	-92.816	17.467
			OXOLOTAN	-92.750	17.383
			CHICOMUSELO	-92.273	15.752
			CASCAJAL	-92.486	16.309
			JALTENANGO	-92.724	15.871
			PORVENIR	-92.814	18.044
			MAMANTEL	-91.098	18.542





*Figura 7.5. Localización de estaciones meteorológicas e hidrométricas en la cuenca del río Grijalva Usumacinta*

Con la caracterización de los sedimentos, el registro de las velocidades de la corriente y las características físicas del agua se determinó cuantitativamente, mediante las formulaciones correspondientes (Rijn, 1993) si hubo presencia de resuspensión de sedimento del fondo, debido a las magnitudes de velocidad registrada durante los monitoreos.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Componentes vectoriales $u$ y $v$ del vector velocidad

A continuación, se presentan la distribución de las velocidades y sus variaciones temporales en la sección transversal del río Grijalva-Usumacinta (figura 5.1), mediante sus componentes vectoriales  $u$  y  $v$ . Donde la componente  $v$  indica flujo positivo (descarga) y flujo negativo (entrada de agua). Mientras la componente  $u$  indica el desplazamiento lateral del flujo, hacia la margen derecha (valores positivos, hacia el lado B) o hacia la margen izquierda (valores negativos, hacia el lado A). Así como; la variación temporal de la marea presente durante cada monitoreo.

En la figura 8.1 (líneas en rojo) se muestra el régimen de marea correspondiente a las fechas de mediciones del 11 al 12 de octubre de 2010, del 5 al 6 de septiembre y del 12 al 13 de noviembre de 2011, el cual fue de tipo diurno, con bajamar en el día y pleamar en las noches.

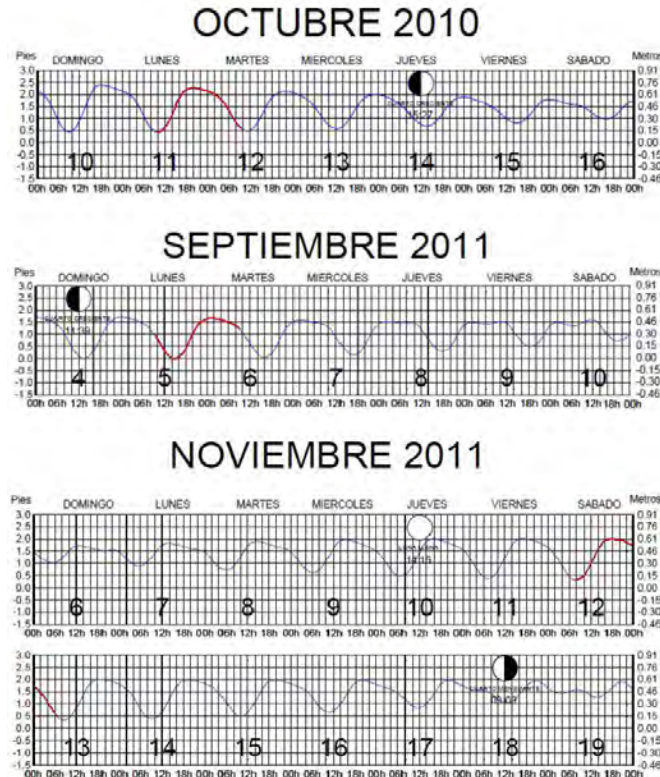


Figura 8.1. Gráficas de mareas registradas en la estación "Frontera, Tab"; obtenidas del Servicio Mareográfico Nacional. La parte en rojo de la línea indica la época de los muestreos.

Las velocidades registradas durante octubre de 2010, muestran valores máximos en la componente  $v$  próximos a los 2.3 m/s y valores mínimos de 0.1 m/s. El flujo fue más intenso en la parte media y superficial de la zona de mayor profundidad del río, y menor en el fondo y zonas someras, pero principalmente hacia las márgenes (figura 8.2).

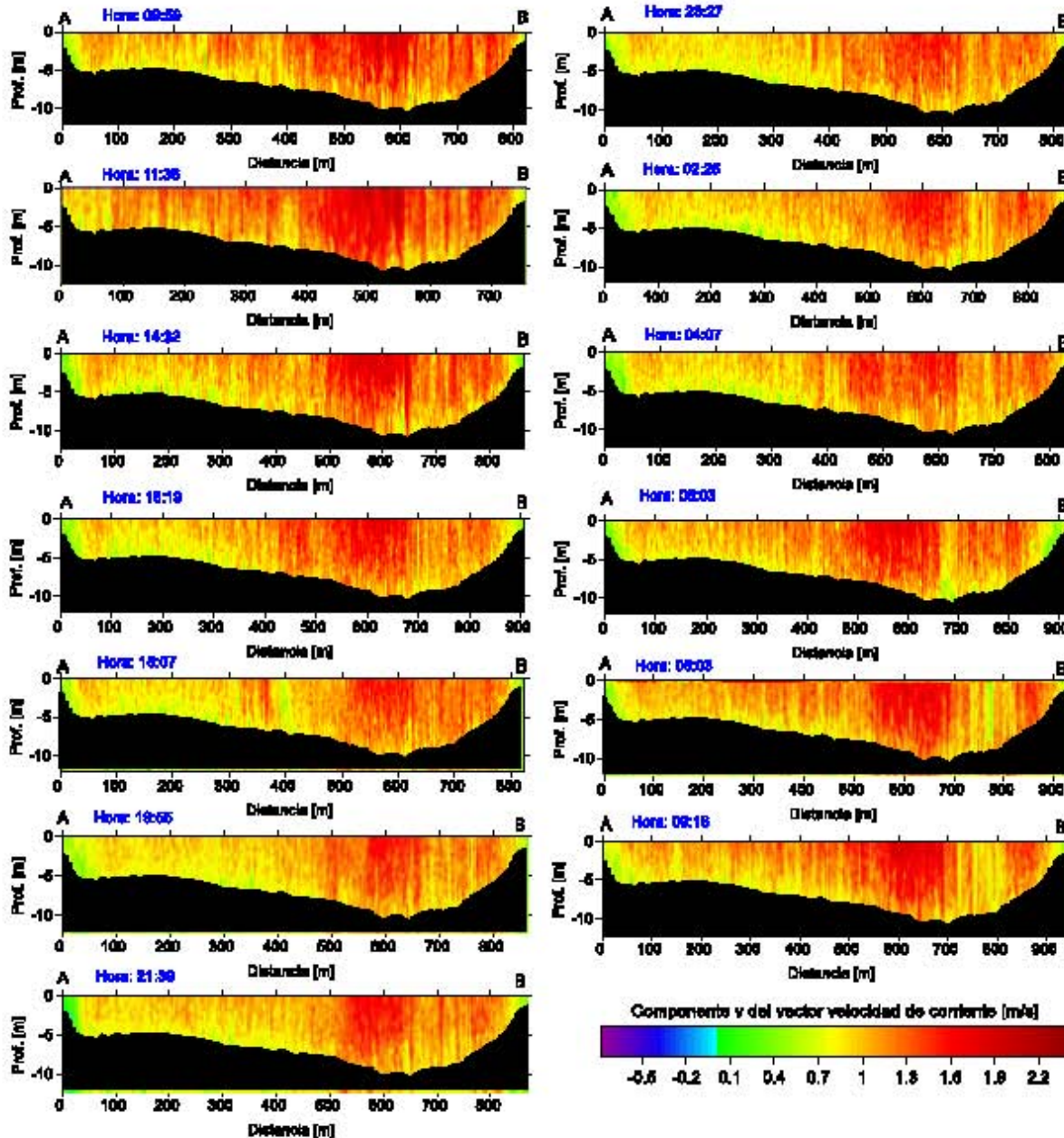
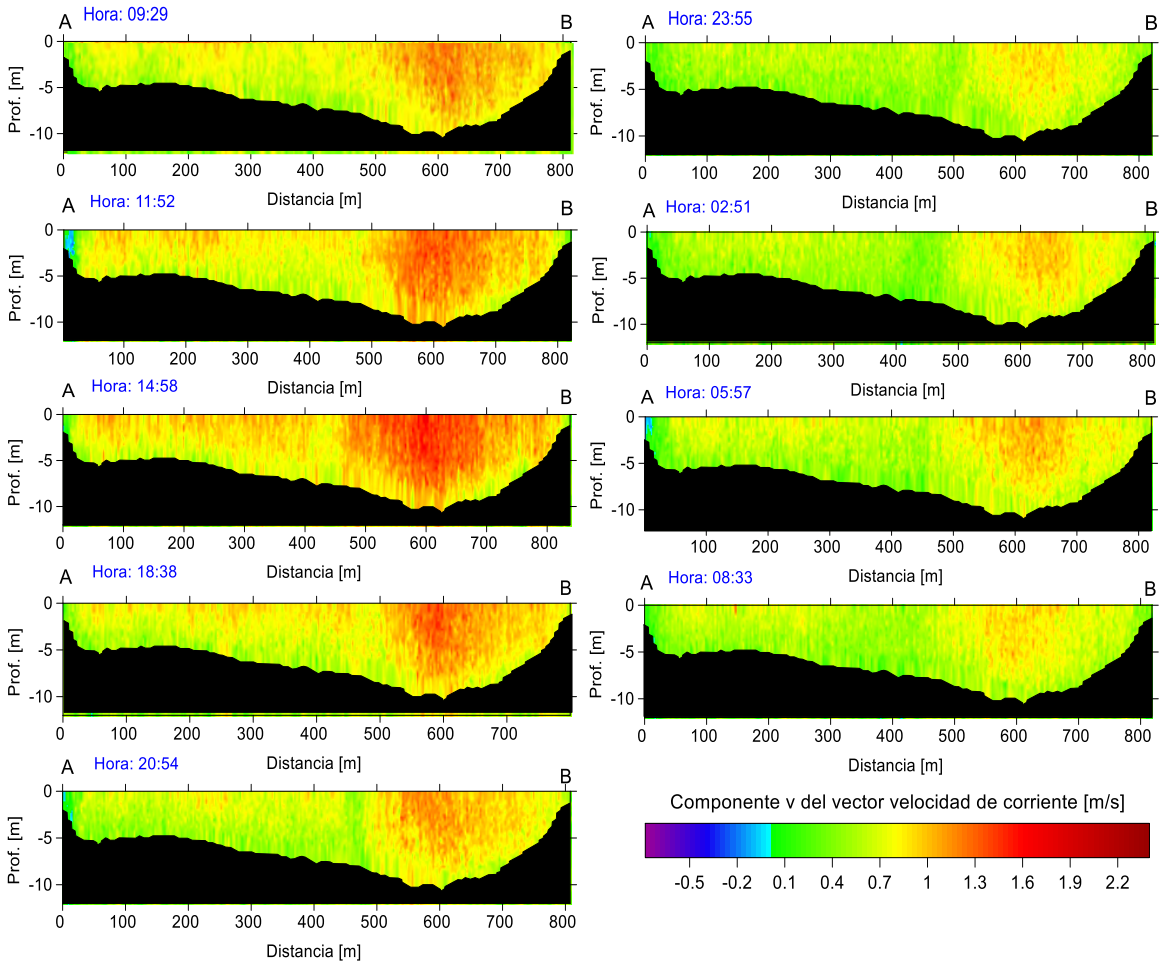


Figura 8.2. Distribución de la componente vectorial  $v$  de la velocidad, en octubre de 2010.

Durante septiembre de 2011, las velocidades fueron menos intensas en la componente  $v$  respecto a la temporada anterior, con velocidades máximas alrededor de 1.6 m/s y

mínimas en general alrededor de 0.1 m/s, e incluso se observó en algunos momentos flujos negativos en la margen izquierda (figura 8.3).



*Figura 8.3. Distribución de la componente vectorial v de la velocidad, en septiembre de 2011.*

Mientras que, en noviembre de 2011, para la componente v, las velocidades máximas se registraron entre 1.6 y 1.9 m/s y las mínimas entre 0.1 y 0.4 m/s (figura 8.4).

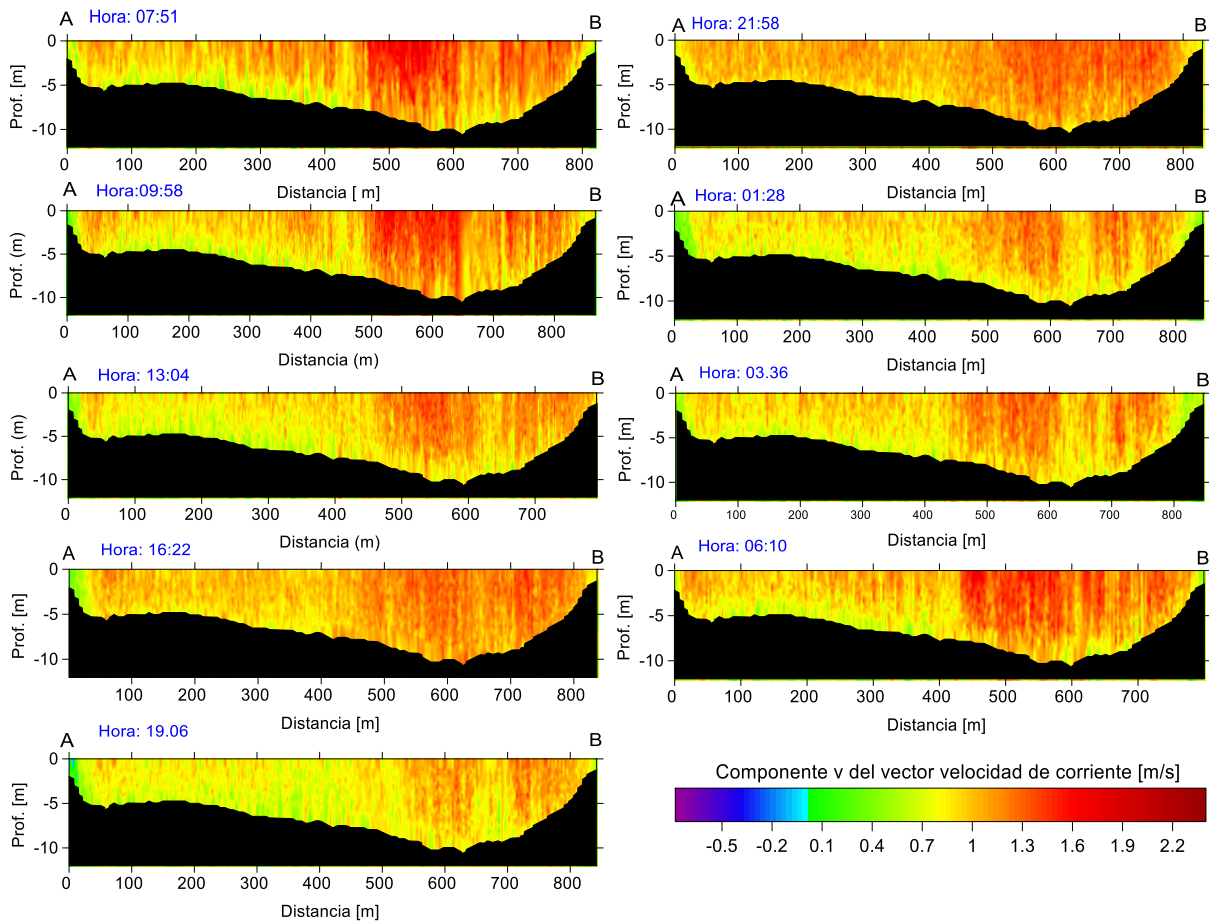


Figura 8.4. Distribución de la componente vectorial  $v$  de la velocidad, en noviembre de 2011.

Para las tres fechas de monitoreo, la distribución de las velocidades fue semejante, las velocidades máximas se localizaron en la parte media y superficial de la zona de mayor profundidad del río y las menores en las regiones someras y principalmente en las zonas que interactúan con el fondo y orillas del río.

En lo que respecta a la componente vectorial  $u$ , las magnitudes son menores en comparación a las obtenidas para la componente  $v$ . En general la componente  $u$  tuvo valores tanto negativos como positivos en un rango promedio de 0.4 a -0.3 m/s y la distribución de estas a través de la sección presentó que en las zonas someras el flujo tiende a desplazarse hacia la margen derecha (valores positivos) y en la parte más profunda hay desplazamiento hacia la margen izquierda (valores negativos) (figuras 8.5-8.7).

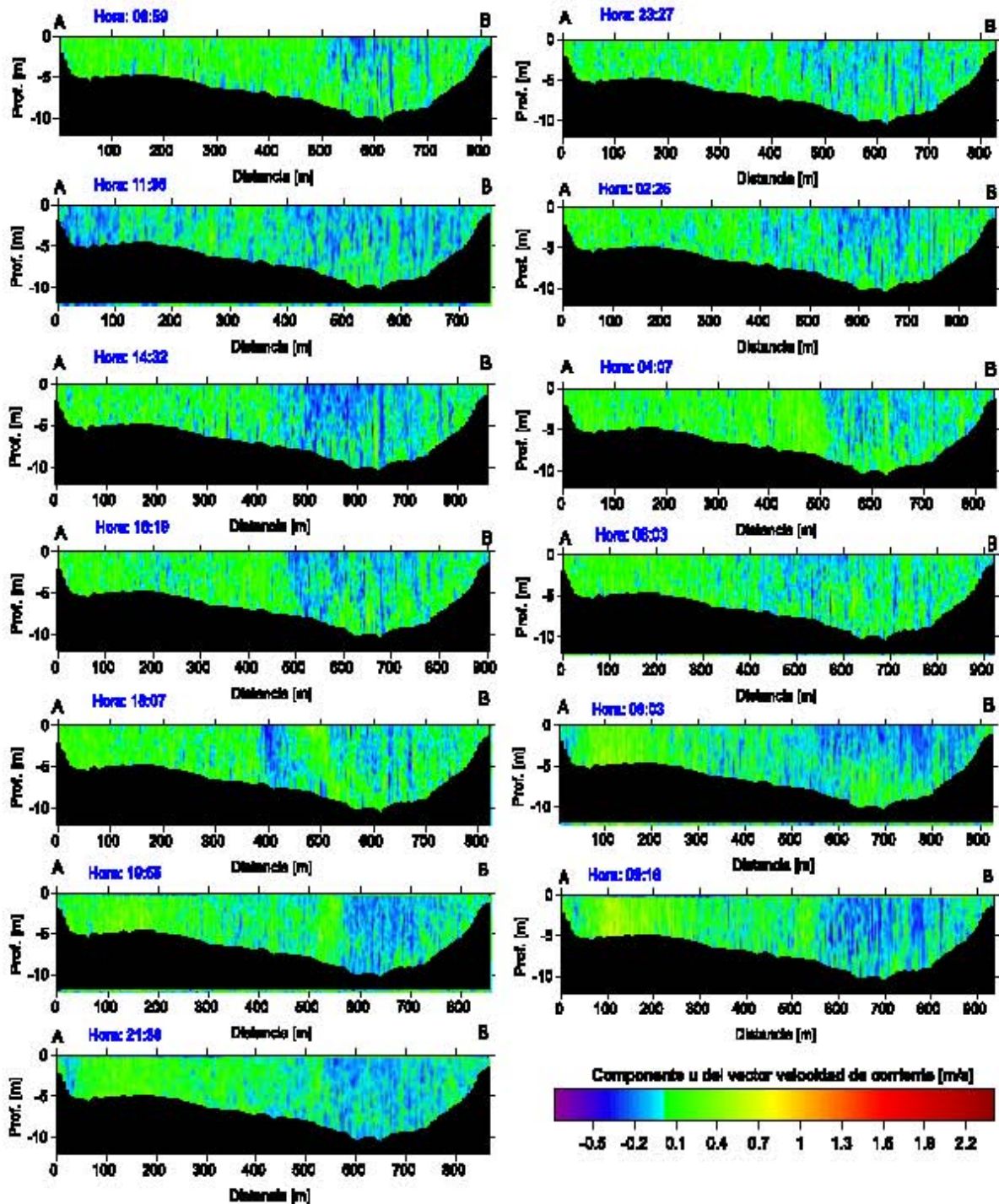


Figura 8.5. Distribución de la componente vectorial  $u$  de la velocidad, en octubre de 2010.

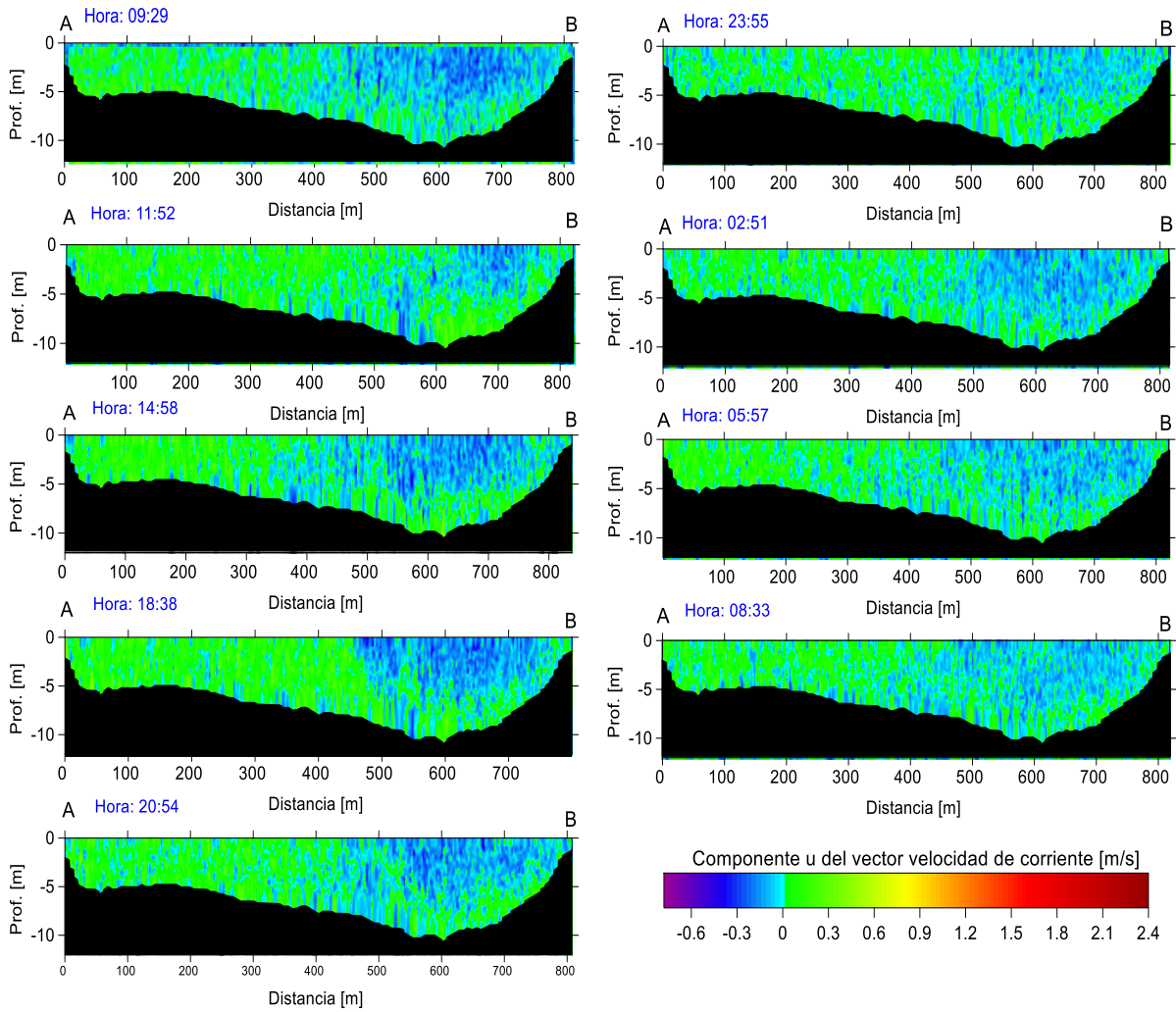
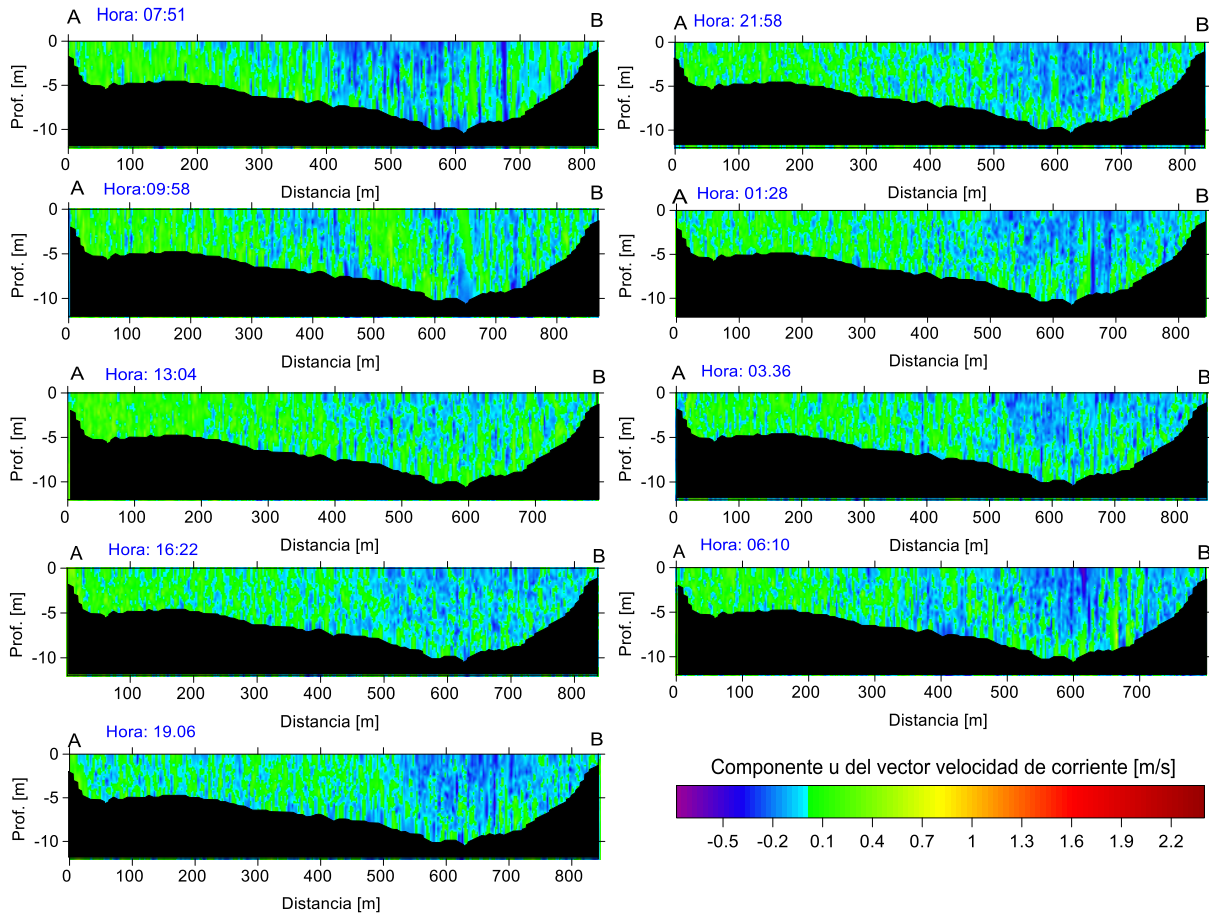


Figura 8.6. Distribución de la componente vectorial  $u$  de la velocidad, en septiembre de 2011.



*Figura 8.7. Distribución de la componente vectorial u de la velocidad, en noviembre de 2011.*

Respecto a las variaciones temporales, se observó la influencia de la marea ya que presentó un incremento en las velocidades durante el periodo de bajamar disminuyendo progresivamente conforme cambiaba el régimen de marea a pleamar, para posteriormente volver a incrementarse acorde al cambio de marea a bajamar. También, se observó comparando el monitoreo de cada fecha con respecto a las otras, que en octubre de 2010 en general, las velocidades fueron más intensas; para septiembre de 2011 hubo una disminución, volviendo a incrementarse para noviembre del mismo año, sin llegar a ser tan intensas como las de octubre del año anterior.



## 8.2 Retrodispersión (Backscatter)

Las secciones de retrodispersión mostraron en general los valores más altos en el fondo, principalmente en la parte somera del cauce. Así mismo, se observó la influencia de la marea en el incremento o decremento de las magnitudes, siguiendo el mismo patrón que las componentes del vector de velocidad; esto es, magnitudes mayores de retrodispersión durante la marea baja, disminuyendo estos con forme crece la marea (figuras 8.8 - 8.10).

Durante octubre de 2010 se tuvieron magnitudes de retrodispersión en promedio entre 90 y 119 dB (figura 8.8).

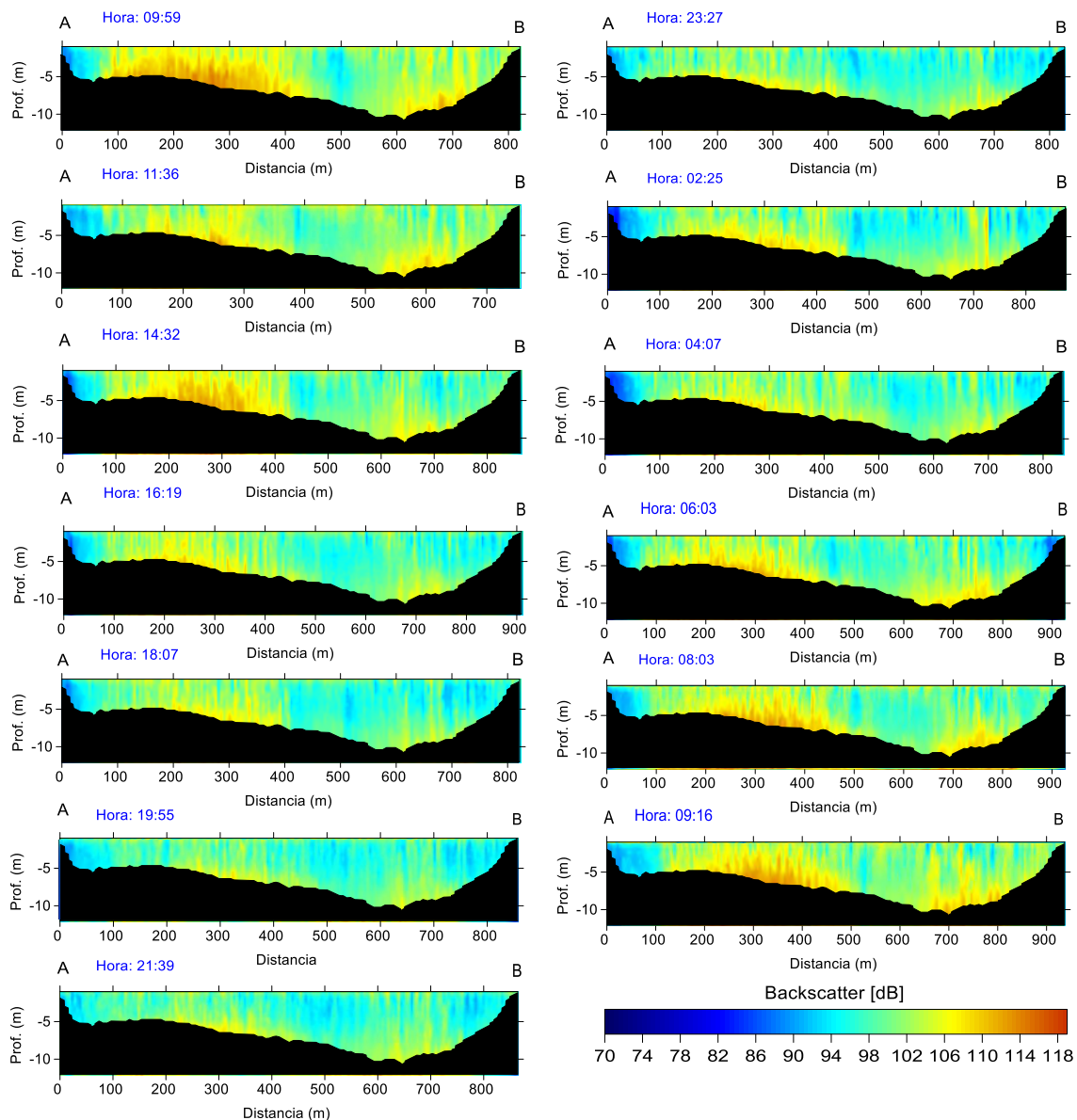
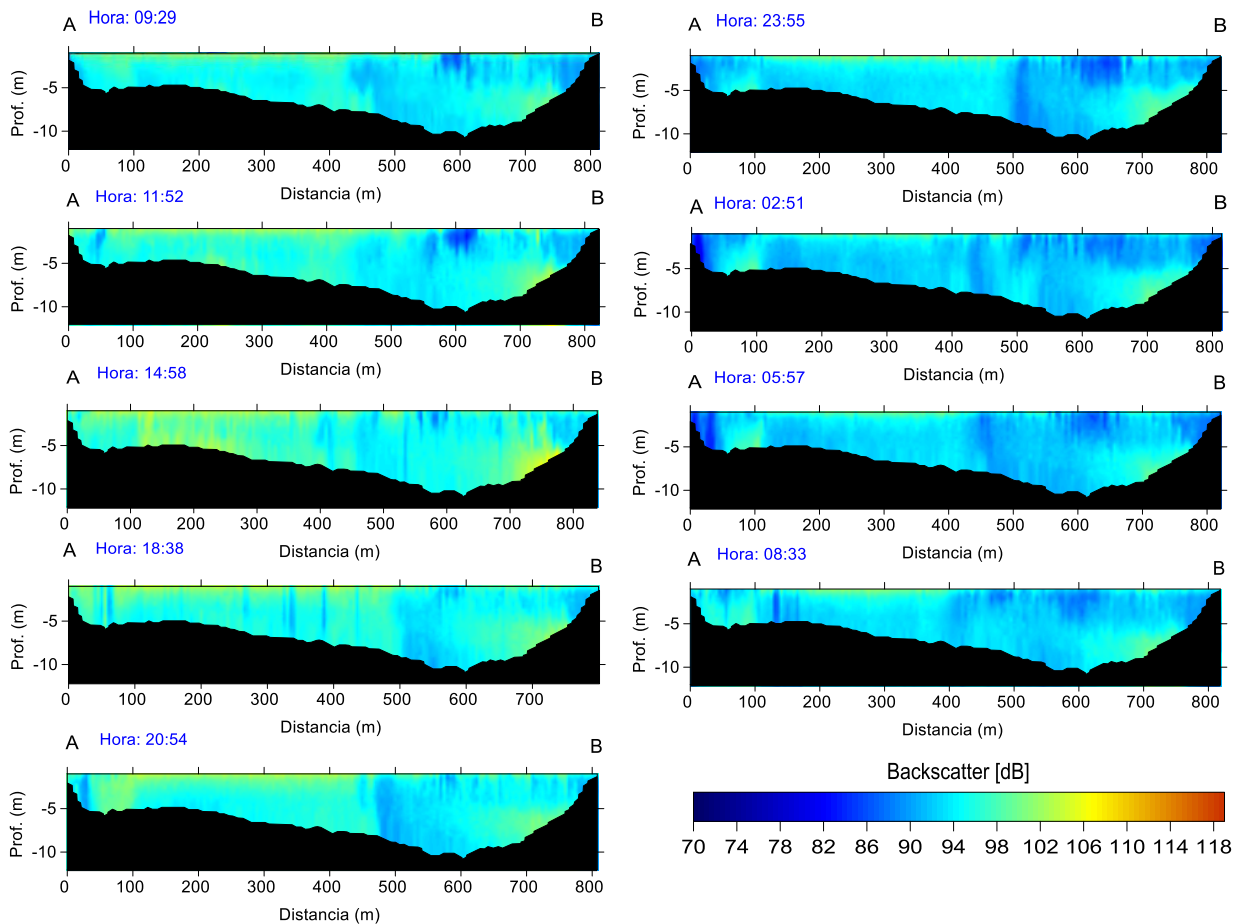


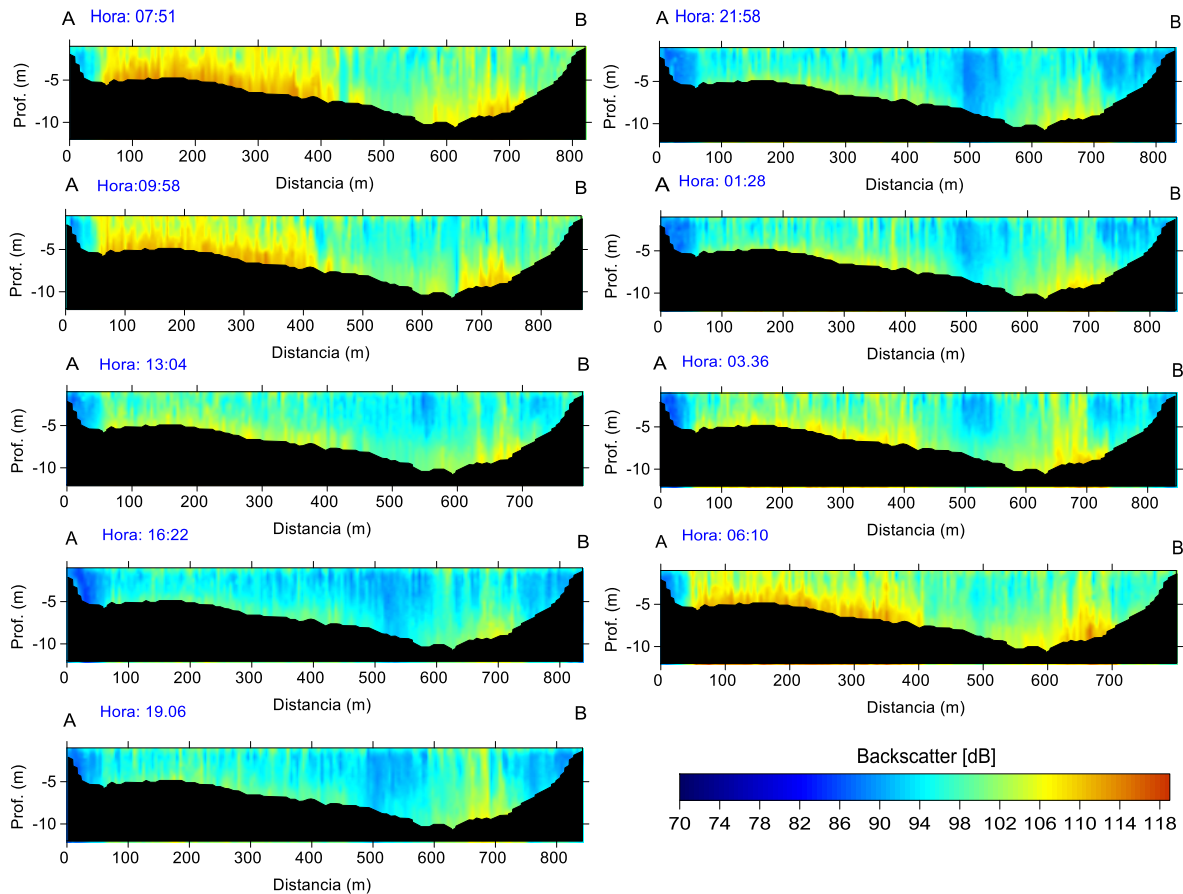
Figura 8.8. Distribución de las magnitudes de retrodispersión, en octubre de 2010.

Durante septiembre de 2011, los valores estimados variaron de 82 hasta 106 dB (figura 8.9).



*Figura 8.9. Distribución de las magnitudes de retrodispersión, en septiembre de 2011.*

La figura 8.10 muestra un rango de valores entre 82 y 118 dB para el monitoreo de noviembre de 2011, rango semejante al de octubre de 2010, pero con un periodo de tiempo en el registro de las mayores magnitudes más corto.



**Figura 8.10.** Distribución de las magnitudes de retrodispersión, en noviembre de 2011.

### 8.3 Caudales

Los caudales totales medidos fueron: para octubre de 2010 en promedio de 6238 m<sup>3</sup>/s, mientras que para septiembre de 2011 de 3903 m<sup>3</sup>/s y para noviembre de 2011 de 5268 m<sup>3</sup>/s (tabla 8.1).

El caudal medido para cada tiempo de muestreo varió siguiendo la tendencia de los cambios en las velocidades (incremento y decremento) debido al efecto producido por la marea como ya se ha mencionado (tabla 8.1), ya que el caudal ésta principalmente en función de la velocidad del flujo, dado que el área transversal del río es la misma (con pequeñas variaciones por la distancia recorrida durante cada registro).

*Tabla 8.1. Caudales totales medidos en las temporadas de octubre de 2010, septiembre y noviembre de 2011 cerca de la desembocadura del Río Grijalva-Usumacinta.*

Octubre 2010		Septiembre 2011		Noviembre 2011	
Hora	Caudal Total [m <sup>3</sup> /s]	Hora	Caudal Total [m <sup>3</sup> /s]	Hora	Caudal Total [m <sup>3</sup> /s]
09:59	6437.61	09:29	4185.07	07:51	5792.86
11:36	6460.42	11:52	4513.21	09:58	5485.28
14:32	6443.87	14:58	4858.99	13:04	5135.60
16:19	6203.39	18:38	4182.11	16:22	4770.07
18:07	5928.23	20:54	3804.50	19:06	4967.91
19:55	6055.69	23:55	3236.29	21:58	4970.65
21:39	6023.30	02:51	3392.49	01:28	5262.70
23:27	6070.95	05:57	3624.14	03:36	5358.28
02:25	6092.06	08:33	3331.51	06:10	5671.42
04:07	6098.84	<b>Promedio</b>	<b>3903.15</b>	<b>Promedio</b>	<b>5268.31</b>
06:03	6388.45				
08:03	6504.72				
09:16	6396.32				
<b>Promedio</b>	<b>6238.76</b>				

#### **8.4 Modelo matemático para la estimación de concentración de sólidos suspendidos (CSS) con los valores de Retrodispersión (backscatter)**

Los resultados de la determinación de la concentración de sólidos en suspensión en gramos por litro, de las muestras colectadas durante septiembre de 2011, se relacionaron con un valor medio de retrodispersión, obtenido del promedio de los valores circundantes a la zona de la sección en que se tomó la muestra (como zona circundante se estableció un rango de  $\pm 10$  m en longitud y de  $\pm 0.5$  m a  $\pm 0.25$  m en profundidad para la parte profunda y somera respectivamente) (tabla 8.2).

*Tabla 8.2. Concentraciones de sólidos suspendidos (gr/l) correspondientes a un valor de retrodispersión (dB) (backscatter).*

<b>No. Muestra</b>	<b>Id_Muestra</b>	<b>CSS [g/l]</b>	<b>Backscatter [dB]</b>
1	7S	0.1704	98.6520
2	7M	0.1076	94.7750
3	7F	0.3163	96.4777
4	8S	0.2268	97.9620
5	8M	0.0944	91.7900
6	8F	0.1056	93.2640
7	9S	0.2100	101.1620
8	9M	0.1872	95.9720
9	9F	0.1168	93.7730
10	10S	0.1396	98.7855
11	10M	0.0456	95.3500
12	10F	0.0708	98.7320
13	11S	0.0484	97.3560
14	11M	0.0300	91.9230
15	11F	0.0240	90.5130
16	12S	0.1252	102.9620
17	12M	0.1208	96.8220
18	12F	0.0720	94.5180

Para el análisis estadístico no se consideró la muestra 7F, debido a que el valor de concentración medido fue muy alto respecto al resto de las muestras, esta cantidad elevada de concentración probablemente fue debido a que en el momento de la colecta se haya tocado el fondo, ya que la muestra corresponde a esa parte de la columna de agua.

De esta relación se obtuvo que la línea de tendencia que se ajusta mejor a la dispersión de los datos, fue la descrita por una función exponencial (figura 8.11), por lo que se obtuvo el logaritmo base 10 de las concentraciones, con la finalidad de que el modelo cumpliera con la condición de normalidad.

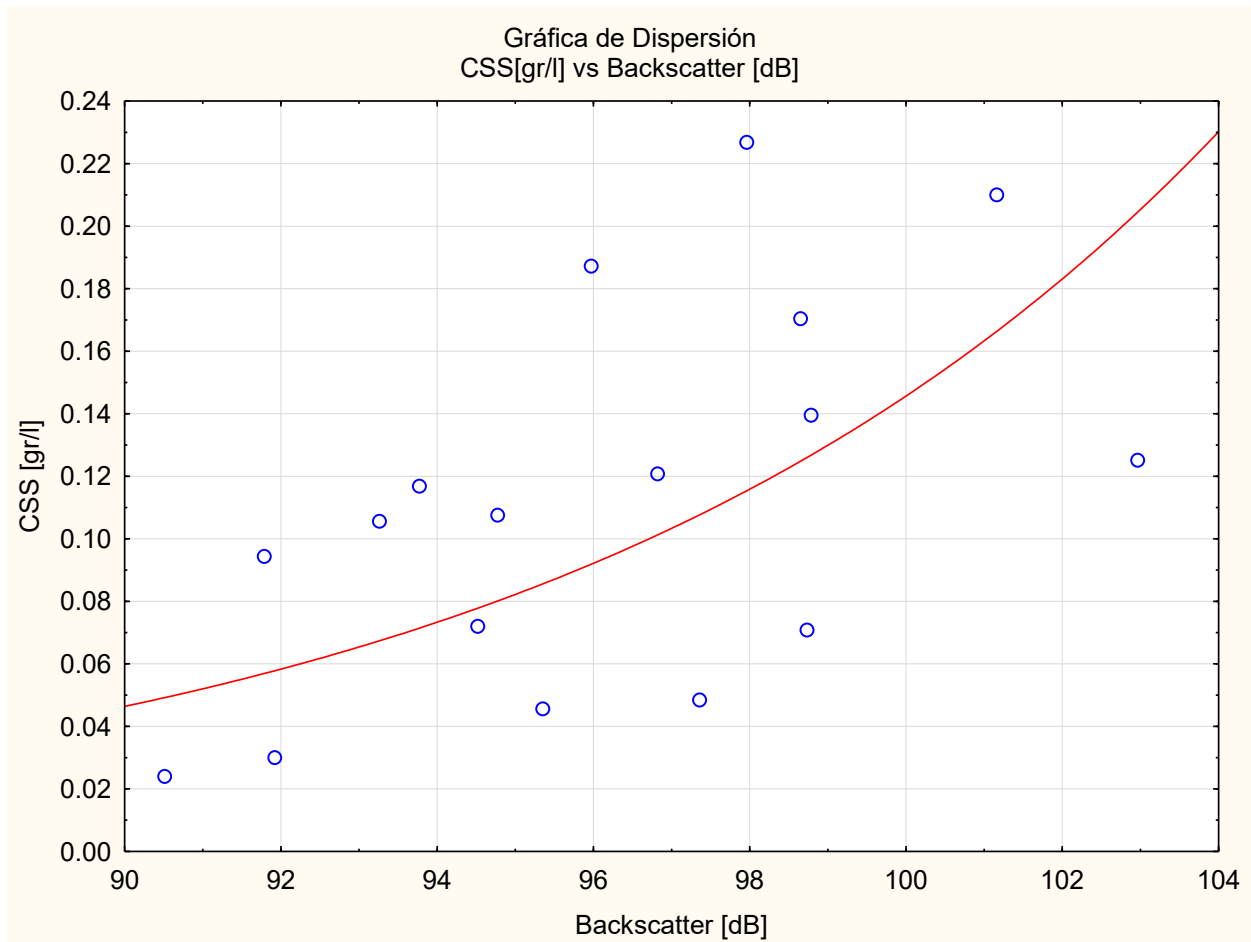


Figura 8.11. Gráfica de dispersión y línea de tendencia de la concentración de sólidos suspendidos y los valores de retrodispersión.

Una vez realizado lo anterior, se obtuvo la ecuación que relaciona el logaritmo base 10 de la CSS en gramos por litro con los valores de retrodispersión en decibeles a través de una regresión lineal (figura 8.12), dicha ecuación es la siguiente.

$$\log_{10}CSS = -5.8053 + (0.0497 * Bs)$$

Donde:

CSS - Concentración de sólidos en suspensión

Bs – Retrodispersión o Backscatter

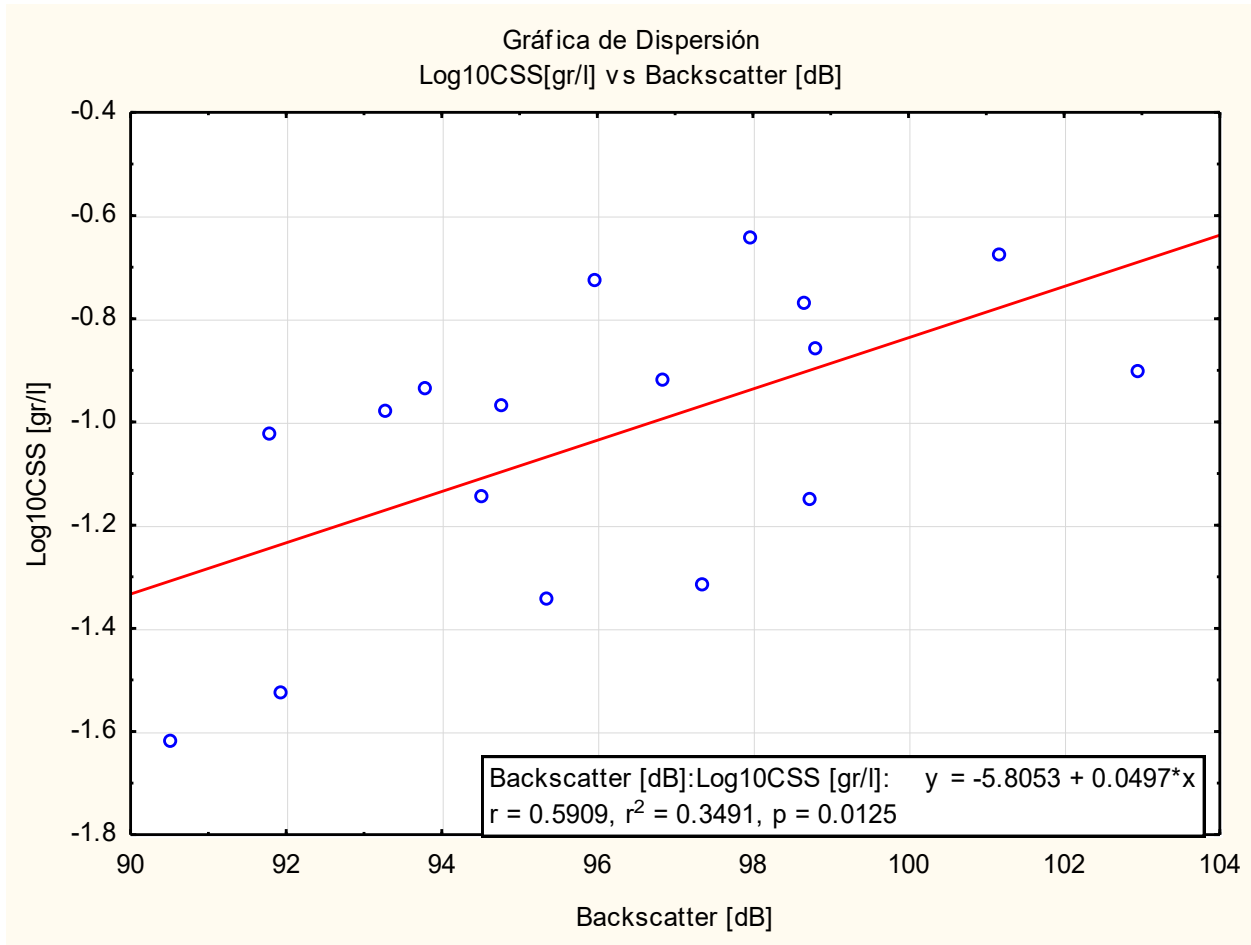


Figura 8.12. Regresión lineal obtenida con los valores del logaritmo base 10 de las concentraciones de sólidos suspendidos y los valores de retrodispersión.

La correlación  $r$  fue de 0.5909 dando una  $r^2 = 0.3491$  la cual es baja pero significativa dado el valor de  $p = 0.0125$  ( $p < \alpha = 0.05$ ). Por lo tanto, la expresión matemática que se estableció para determinar la concentración de sólidos sedimentables a partir de los valores obtenidos de retrodispersión para el río Grijalva-Usumacinta, es la siguiente:

$$CSS = Exp^{-5.8053+0.0497*Bs}$$

Y es aceptable de acuerdo al análisis de residuos realizado entre el valor estimado y la diferencia de los valores medidos, menos los estimados, de la cual, se observó la

homocedasticidad del modelo (la varianza de los errores es constante) y aleatoriedad de los datos (figura 8.13)

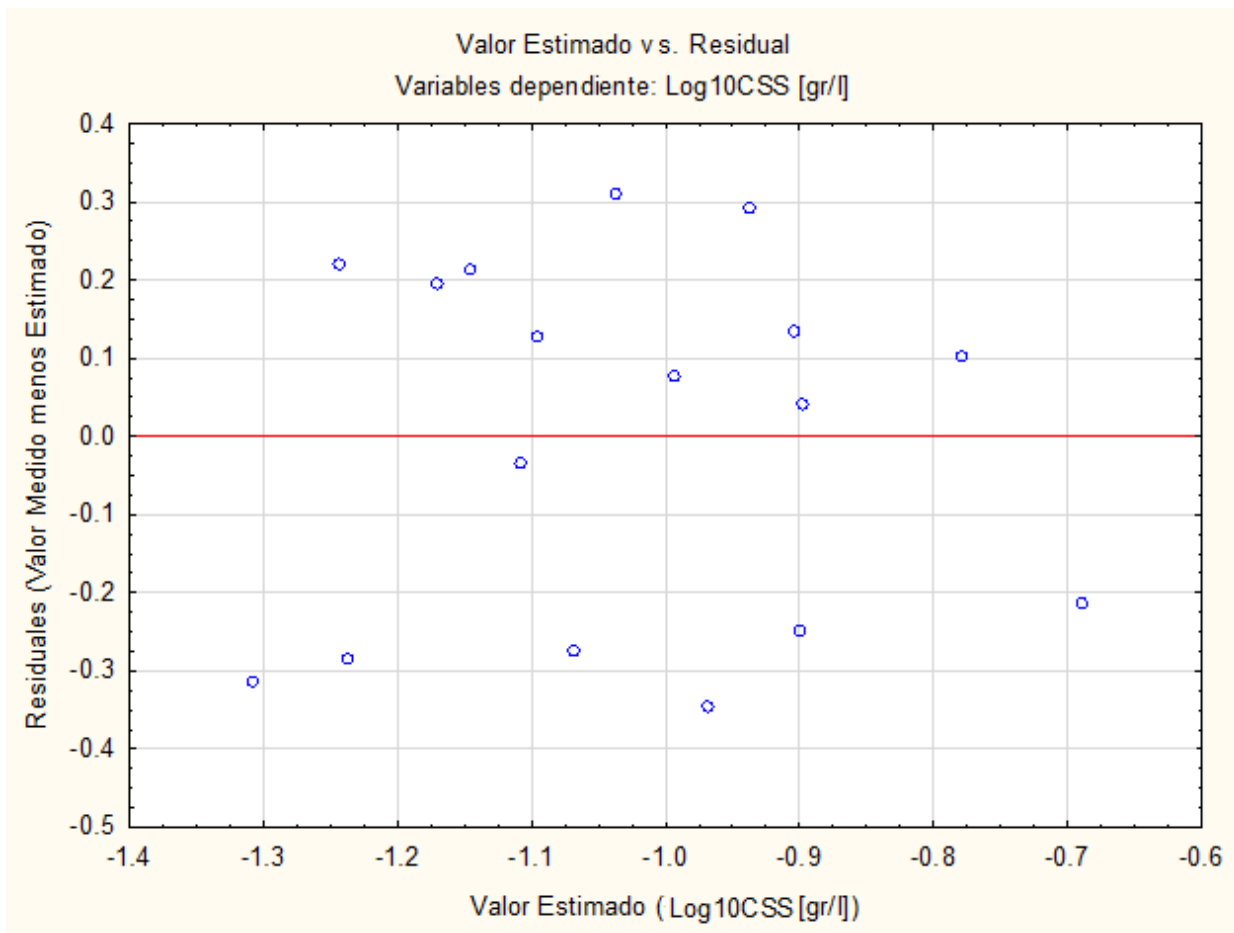


Figura 8.13. Resultante del análisis de residuos, la distribución de los puntos indica homocedasticidad del modelo y la aleatoriedad de los datos.

### 8.5 Concentración de Sólidos en Suspensión transportados por el Río Grijalva-Usumacinta

Una vez implementado la expresión matemática para determinar las concentraciones de sólidos suspendidos con los datos de retrodispersión, se realizaron los cálculos para los tiempos de registro, estos resultados se describen a continuación:

Para octubre de 2010 se tuvieron las distribuciones de concentraciones más altas con respecto a las otras dos fechas, con cantidades estimadas de hasta 1 gr/l. El periodo de



24 horas de monitoreo realizado mostró que los tiempos en que mayor concentración se tuvo fue cuando se tenía marea baja (figura 8.14). El intervalo de los promedios para cada tiempo de medición varió entre 0.125 y 0.233 gr/l, y se obtuvo un valor medio de 0.172 gr/l (tabla 8.3).

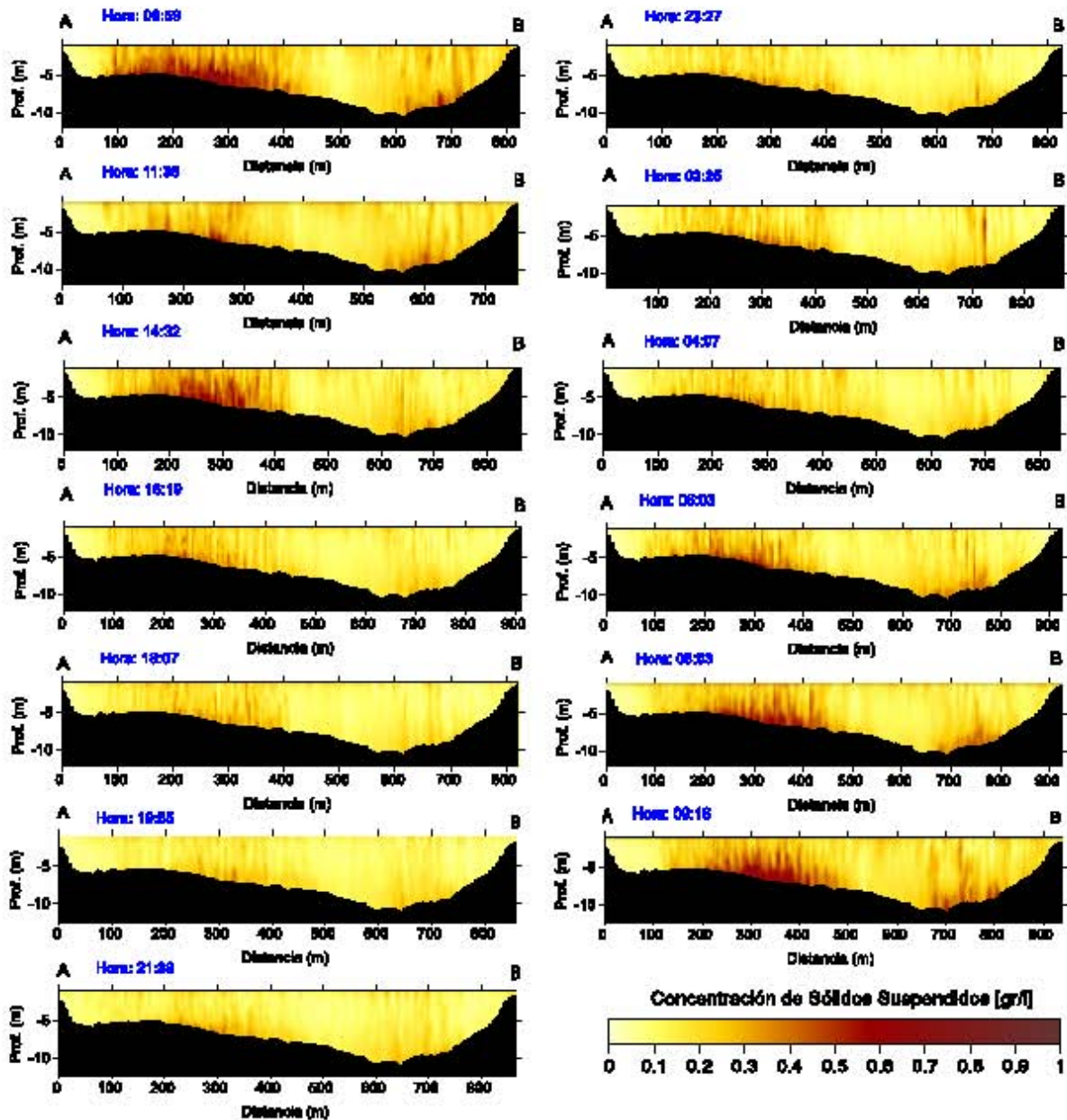


Figura 8.14. Distribución de la concentración de sólidos suspendidos [gr/l], en octubre de 2010.

Durante septiembre de 2011 se tuvieron concentraciones menores respecto al monitoreo de octubre de 2010 y noviembre 2011, con valores máximos cercanos a los 0.3 gr/l, en periodos de marea baja (figura 8.15). La cantidad media de sólidos suspendidos tuvo un rango de 0.064 a 0.1 gr/l, con una concentración media general de 0.083 gr/l para esta fecha (tabla 8.3). Cabe resaltar que el rango de las concentraciones estimadas para esta fecha tuvo mínimos menores a 0.1 gr/l y máximos de 0.3 gr/l (figura 8.15), intervalo de valores semejante al de las concentraciones medidas de las muestras de agua tomadas en esta fecha (tabla 8.2), lo que significa que el modelo esta calibrado.

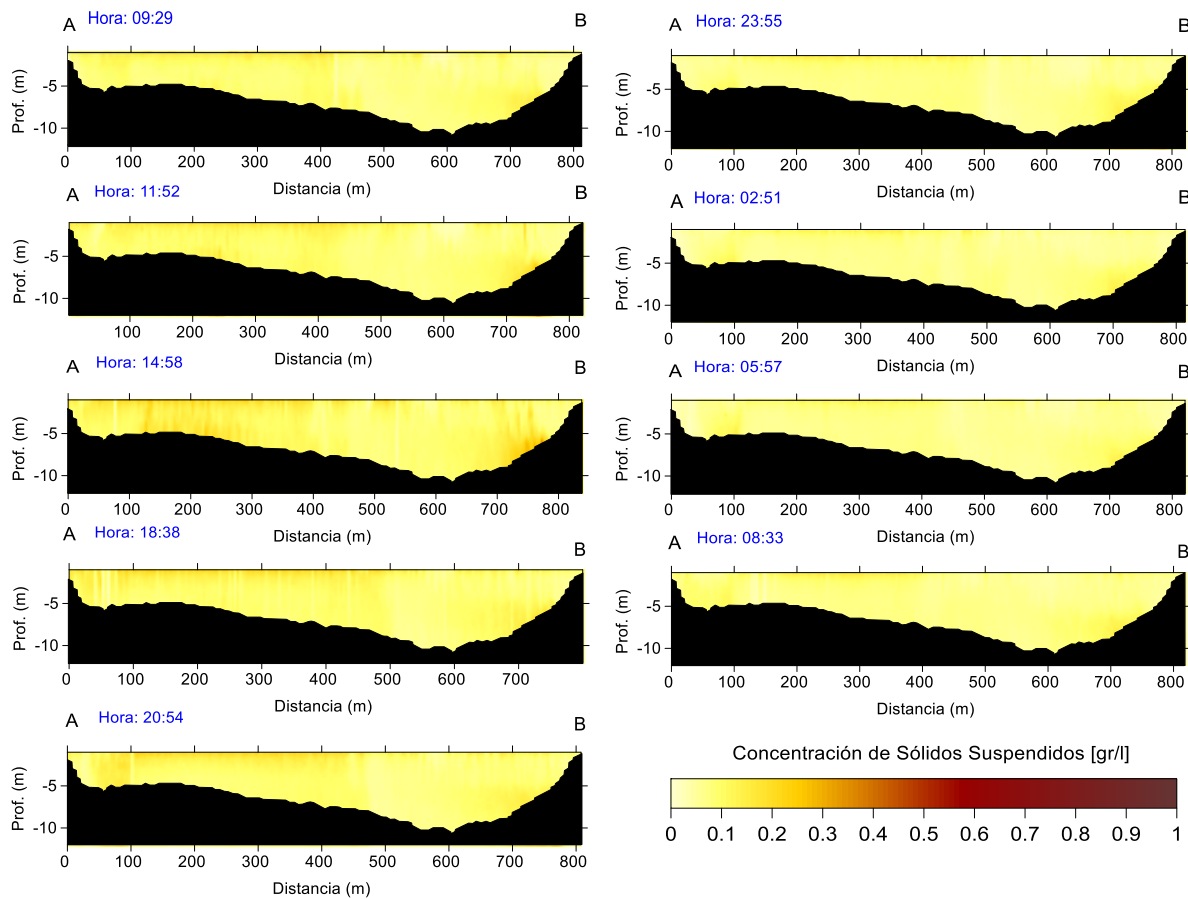
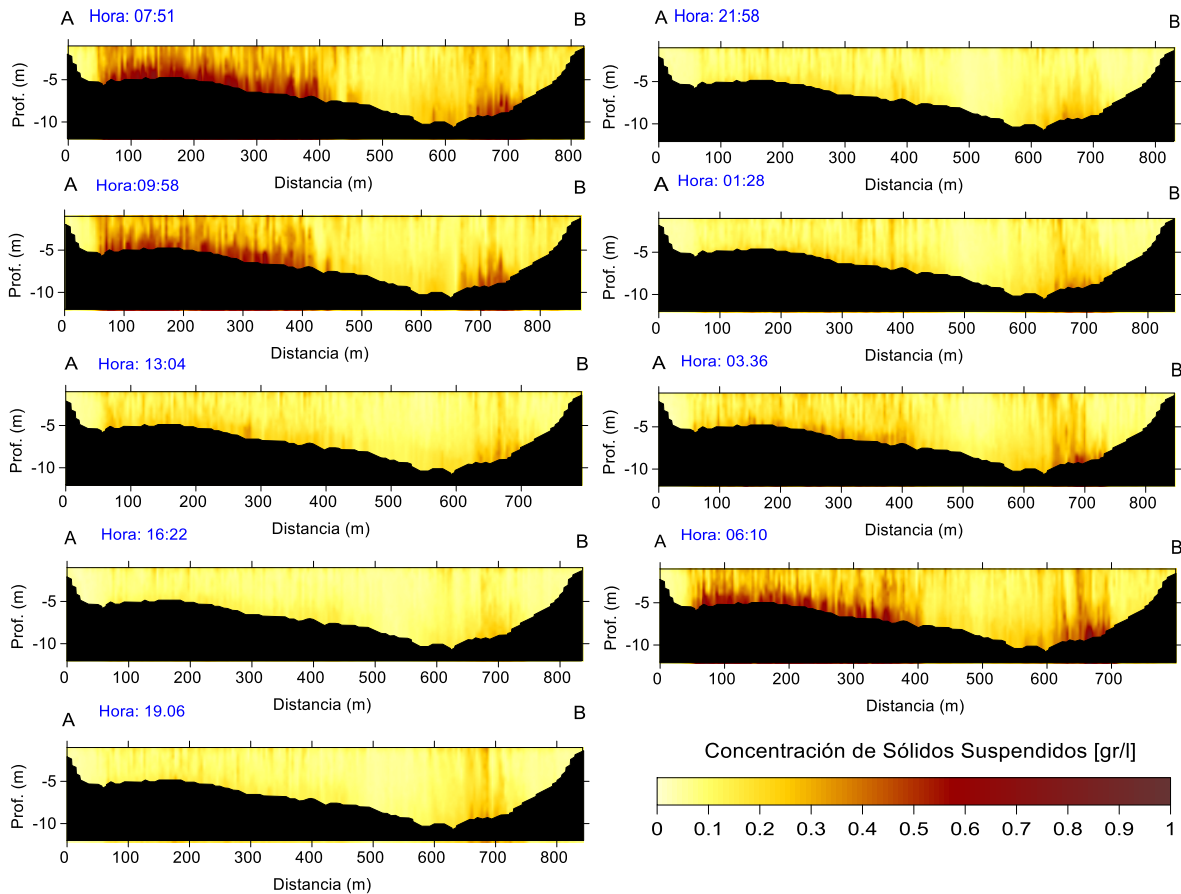


Figura 8.15. Distribución de la concentración de sólidos suspendidos [gr/l], en septiembre de 2011.

En noviembre de 2011 las concentraciones estimadas tuvieron valores máximos alrededor de 0.09 gr/l, valores que son altos, pero sin llegar a ser de la misma magnitud que los de septiembre de este mismo año, igual que en los periodos de muestreo anteriores, estas cantidades altas coincidieron con el tiempo en que las corrientes son más fuertes debidos

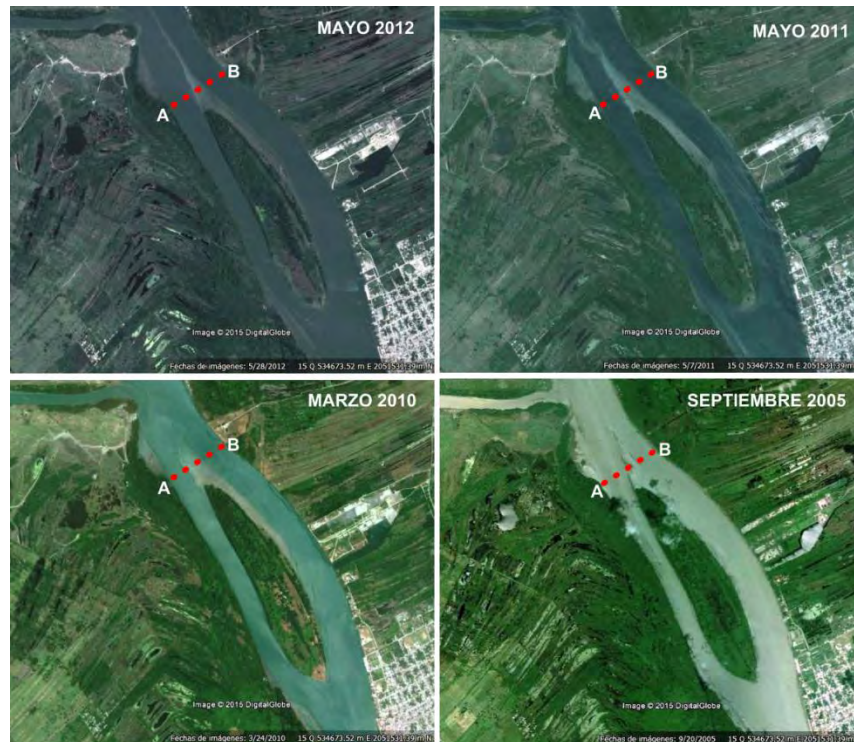
a la marea de reflujó (figura 8.16). Los promedios de las concentraciones de cada intervalo de medición variaron para este mes de 0.088 gr/l a 0.221 gr/l, con un promedio general de 0.14 gr/l (tabla 8.3).



**Figura 8.16.** Distribución de la concentración de sólidos suspendidos [gr/l], en noviembre de 2011.

La distribución y variación temporal y espacial de las concentraciones se puede observar de un análisis cualitativo de imágenes satelitales históricas tomadas de Google Earth® 2015.

En la figura 8.17 se puede observar que el islote que se ubica cientos de metros aguas arriba de donde se ubicó la sección de monitoreo genera una pluma de sedimentos posterior a esta, la cual concuerda con la zona en que se encontraron las mayores concentraciones en todas las fechas de monitoreo, además la pluma de sedimentos varió de tamaño en los diferentes tiempos de toma de las imágenes.



*Figura 8.17. Imágenes satelitales de las plumas de sedimentos en la zona de monitoreo, (imágenes, Google Earth®, 2015).*

### **8.6 Cantidad de sedimentos descargado por el Río Grijalva-Usumacinta**

Con las estimaciones de las concentraciones y los caudales se calcularon las cantidades de sólidos suspendidos que descarga el río Grijalva-Usumacinta hacia la costa. En la tabla 8.3 se muestran los valores calculados para cada fecha de muestreo. Se tuvieron las mayores cantidades durante octubre de 2010, donde de acuerdo al momento del ciclo de marea en que se haya medido, se descargaron de 755.7 kg/s hasta 1500 kg/s, el valor medio de descarga para esta fecha fue de una cantidad de 1080.1 kg/s. Le subyace noviembre de 2011, con una descarga menor de 419.9 kg/s y llegó a descargar hasta 1279.4 kg/s, con un valor medio de 749.7 kg/s. Fue así; septiembre de 2011 donde se calcularon valores de descarga de sólidos en suspensión menores, ya que las descargas variaron entre 219.5 kg/s y 515.0 kg/s, y el valor medio para esta temporada fue de 328.1 kg/s. Con estas cantidades estimadas se observó la variabilidad en las magnitudes de los sólidos en suspensión que descarga el río hacia el mar (Tabla 8.3).

*Determinación de la cantidad de sólidos suspendidos en la desembocadura del cauce del río Grijalva-  
Usumacinta, Tabasco, México*

Tabla 8.3. Promedio de las concentraciones y descargas de sólidos suspendidos estimados para el Río Grijalva-Usumacinta, para los tiempos de registro durante octubre 2010, septiembre y noviembre de 2011.

Octubre 2010				Septiembre 2011				Noviembre 2011			
Hora	Caudal Total [m <sup>3</sup> /s]	Promedio CSS [gr/l]	Descarga de Sólidos Suspendidos [Kg/s]	Hora	Caudal Total [m <sup>3</sup> /s]	Promedio CSS [gr/l]	Descarga de Sólidos Suspendidos [Kg/s]	Hora	Caudal Total [m <sup>3</sup> /s]	Promedio CSS [gr/l]	Descarga de Sólidos Suspendidos [Kg/s]
09:59	6437.61	0.233	1500.7	09:29	4185.07	0.087	299.8	07:51	5792.86	0.221	1279.4
11:36	6460.42	0.202	1303.7	11:52	4513.21	0.091	414.9	09:58	5485.28	0.181	994.3
14:32	6443.87	0.192	1238.8	14:58	4858.99	0.091	515.0	13:04	5135.60	0.119	611.2
16:19	6203.39	0.151	937.0	18:38	4182.11	0.100	418.6	16:22	4770.07	0.088	419.9
18:07	5928.23	0.140	832.6	20:54	3804.5	0.097	369.4	19:06	4967.91	0.098	486.6
19:55	6055.69	0.125	755.7	23:55	3236.29	0.072	233.6	21:58	4970.65	0.101	500.8
21:39	6023.3	0.135	813.1	02:51	3392.49	0.064	219.5	01:28	5262.70	0.117	616.1
23:27	6070.95	0.138	837.4	05:57	3624.14	0.067	243.7	03:36	5358.28	0.142	760.5
02:25	6092.06	0.153	931.0	08:33	3331.51	0.072	238.7	06:10	5671.42	0.190	1078.3
04:07	6098.84	0.155	943.4	<b>Promedio</b>	<b>3903.15</b>	<b>0.083</b>	<b>328.1</b>	<b>Promedio</b>	<b>5268.3</b>	<b>0.140</b>	<b>749.7</b>
06:03	6388.45	0.175	1118.4								
08:03	6504.72	0.212	1380.6								
09:16	6396.32	0.227	1449.0								
<b>Promedio</b>	<b>6238.76</b>	<b>0.172</b>	<b>1080.1</b>								

## **8.7 Características de los sedimentos en suspensión**

### **Materia orgánica e inorgánica en los sedimentos en suspensión**

Los resultados del análisis de las muestras del sedimento en suspensión para determinar el porcentaje de la fracción de materia orgánica (M.O.) e inorgánica (M.I.), se muestran en la tabla 8.4.

*Tabla 8.4. Contenido de materia orgánica (M.O.) e inorgánica (M. I.) en los sedimentos en suspensión del Río Grijalva – Usumacinta.*

NO. DE MUESTRA	N° Muestra	Coordenadas UTM		M.O. (%)	M. I. (%)
		X	Y		
1	7S	533963	2053409	20	80
2	7M	533963	2053409	10	90
3	7F	533963	2053409	5	95
4	8S	533754	2053809	15	85
5	8M	533754	2053809	15	85
6	8F	533754	2053809	5	95
7	9S	533435	2053234	15	85
8	9M	533435	2053234	5	95
9	9F	533435	2053234	10	90
10	10S	533948	2053383	20	80
11	10M	533948	2053383	15	85
12	10F	533948	2053383	5	95
13	11S	533772	2053301	15	85
14	11M	533772	2053301	10	90
15	11F	533772	2053301	10	90
16	12S	533450	2053209	3	97
17	12M	533450	2053209	2	98
18	12F	533450	2053209	3	97

Se observó una predominancia de materia inorgánica, con porcentajes mayores al 80% en la composición de los sedimentos (Tabla 8.4), dicha materia inorgánica estaba conformada de partículas de minerales de cuarzo y feldespato (sedimentos terrígenos), mientras que la materia orgánica estaba conformada de fragmentos de madera y hojas principalmente.

### **Granulometría**

Los parámetros granulométricos de los sedimentos en suspensión de las fracciones de superficie, medio y fondo del cauce (Tabla 8.5), Mostraron que las partículas están dentro

del rango de tamaño de limos muy gruesos según la escala de tamaños de Udden y Wentworth (modificada por Friedman y Sanders, 1978). Los porcentajes de arenas, limos y arcillas corroboran que el mayor porcentaje de sedimentos que transporta el río corresponden a los limos, con un contenido entre 57 y 76%, donde los niveles medio y fondo tuvieron los de mayor porcentaje. Las cantidades de arena (principalmente muy fina) estuvieron en cantidades entre 37 y 4%, y fue en la superficie del cauce donde hubo mayor presencia y menor a nivel medio. Caso inverso se presentó con el porcentaje de arcilla que tuvo un rango de 4 a 23%, donde la mayor presencia estuvo en la parte media, y menor tanto en superficie como en el fondo.

*Tabla 8.5. Granulometría de los sedimentos en suspensión de Río Grijalva- Usumacinta.*

Parámetro	Fracción del Cauce		
	Superficie	Medio	Fondo
Diámetro medio partícula ( $\mu\text{m}$ )	47.94	31.58	30.35
% Arena	37.62	4.02	16.64
% Limo	57.69	72.85	76.87
% Arcilla	4.69	23.13	6.49
D <sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ )	47.94	31.58	30.35
D <sub>90</sub> ( $\mu\text{m}$ )	116.4	96.58	102.6

### **8.8 Resuspensión de sedimentos**

Con los datos obtenidos del análisis granulométrico de las muestras del fondo; así como, de las mediciones en campo y mediante las formulaciones para el cálculo de la velocidad crítica promedio en profundidad, para la resuspensión  $U_{cr,s}$  (Rijn, 1993), se realizó el cálculo de dichas velocidades, para determinar si existe resuspensión de sedimentos del lecho del río.

La tabla 8.6 muestra los resultados de los parámetros calculados y medidos necesarios para determinar las velocidades críticas en función de la profundidad del río.

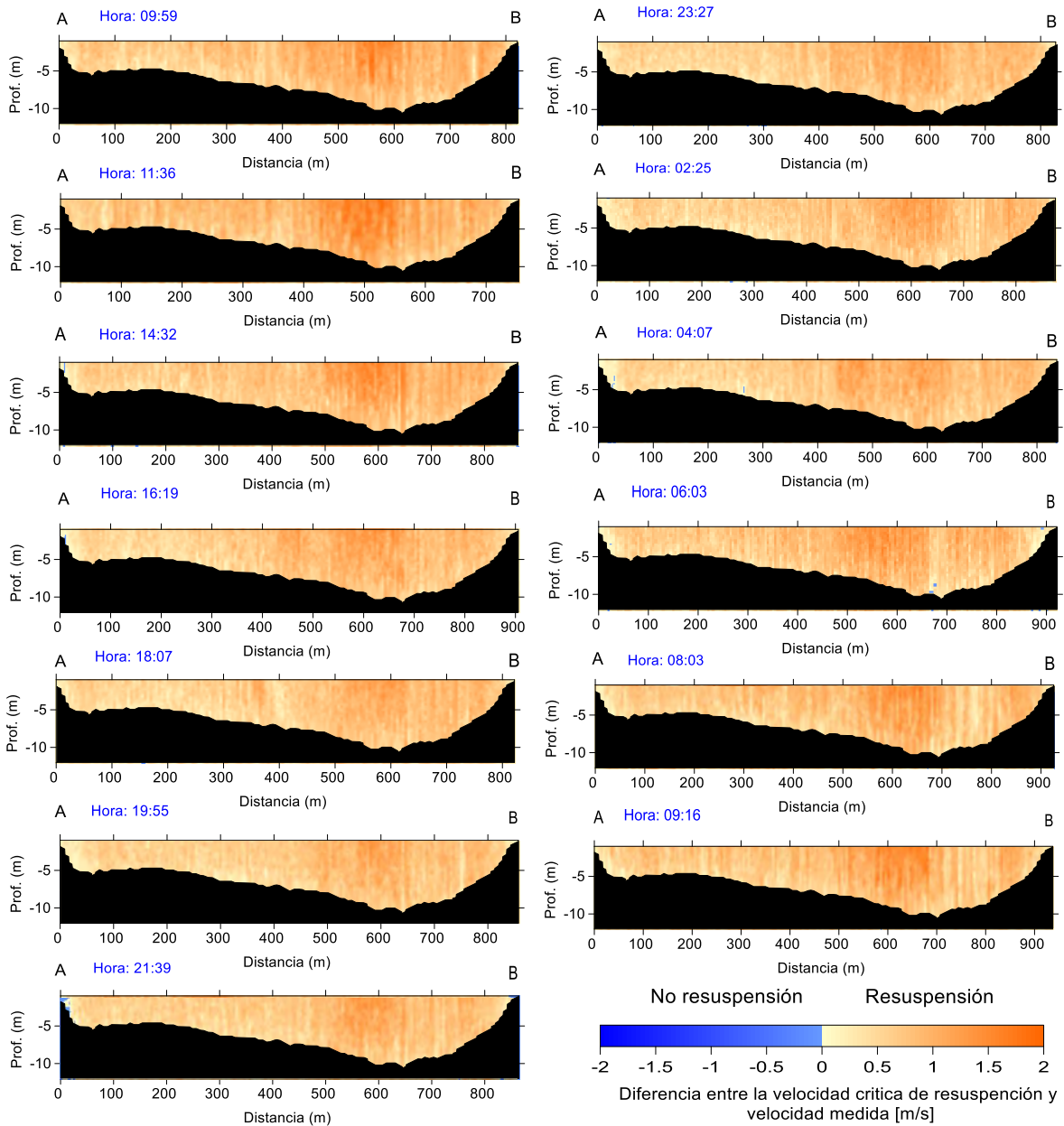
**Tabla 8.6. Parámetros físicos para la determinación de las velocidades críticas promediadas en la profundidad para suspensión  $u_{cr,s}$ .**

Parámetros	Magnitud	Unidades
Temperatura promedio del agua – T	27	[°C]
Gravedad - g	9.81	[m/s <sup>2</sup> ]
Densidad del agua – $\rho$	1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
Densidad del sedimento - $\rho_s$	2650	[kg/m <sup>3</sup> ]
Porcentaje de sedimento fino < 50 $\mu\text{m}$ - $P_s$		
$D_{50}$	$30 \times 10^{-6}$	[m]
$D_{90}$	$102 \times 10^{-6}$	[m]
Coefficiente de viscosidad cinemática - $\nu$	$0.966 \times 10^{-6}$	[m <sup>2</sup> /s]
Velocidad de caída de la partícula - $w_s$	$8.98 \times 10^{-4}$	[m/s]
Parámetro de partícula adimensional - $D^*$	0.835	[-]
Parámetro de movilidad crítica de la partícula para la suspensión - $\theta_{cr,s}$	0.038	[-]
Esfuerzo de cizalle crítico para la suspensión - $T_{b,cr,s}$	0.01835	[N/m <sup>2</sup> ]

Para cada periodo de cada muestreo se calcularon las velocidades críticas para la suspensión de sedimentos,  $u_{cr,s}$  de acuerdo a las profundidades registradas en la sección transversal del río. Con las velocidades críticas  $u_{cr,s}$  se obtuvo la diferencia correspondiente con las magnitudes de las velocidades medidas para cada momento en toda la sección, se obtuvieron valores menores (signo negativo) y mayores (signo positivo) con respecto a las velocidades críticas  $u_{cr,s}$ . Cabe mencionar que las velocidades que generan la resuspensión son las que interactúan con el fondo.

Las figuras 8.18 a 8.20, muestran la diferencia de las velocidades medidas con respecto a las velocidades críticas; la zona para determinar si hubo resuspensión de sedimento es la que limita con el fondo. Por lo tanto, en octubre de 2010 se observó, para todo el periodo de monitoreo, que existió resuspensión del fondo en el canal principal del río (figura 8.18). En el monitoreo de septiembre 2011 también hubo resuspensión, salvo en algunos instantes, en algunas zonas del fondo de la parte somera del río y margen izquierda, las velocidades no superaron la velocidad crítica  $u_{cr,s}$  (valores negativos); por lo que no se produjo resuspensión, dichos instantes fueron durante los efectos de marea alta (llenante) (figura 8.19). En noviembre de 2011, al igual que en octubre de 2010, las velocidades registradas indicaron que hubo resuspensión de sedimento del fondo en todo el ciclo de medición, con una pequeña zona en la margen izquierda, que indicó que no se alcanzó a resuspender el sedimento en un determinado momento (pleamar) (figura 8.20).





**Figura 8.18.** Diferencia de velocidades medidas y las velocidades críticas  $u_{cr,s}$  para determinar presencia de resuspensión de sedimentos del lecho del río, octubre 2010.

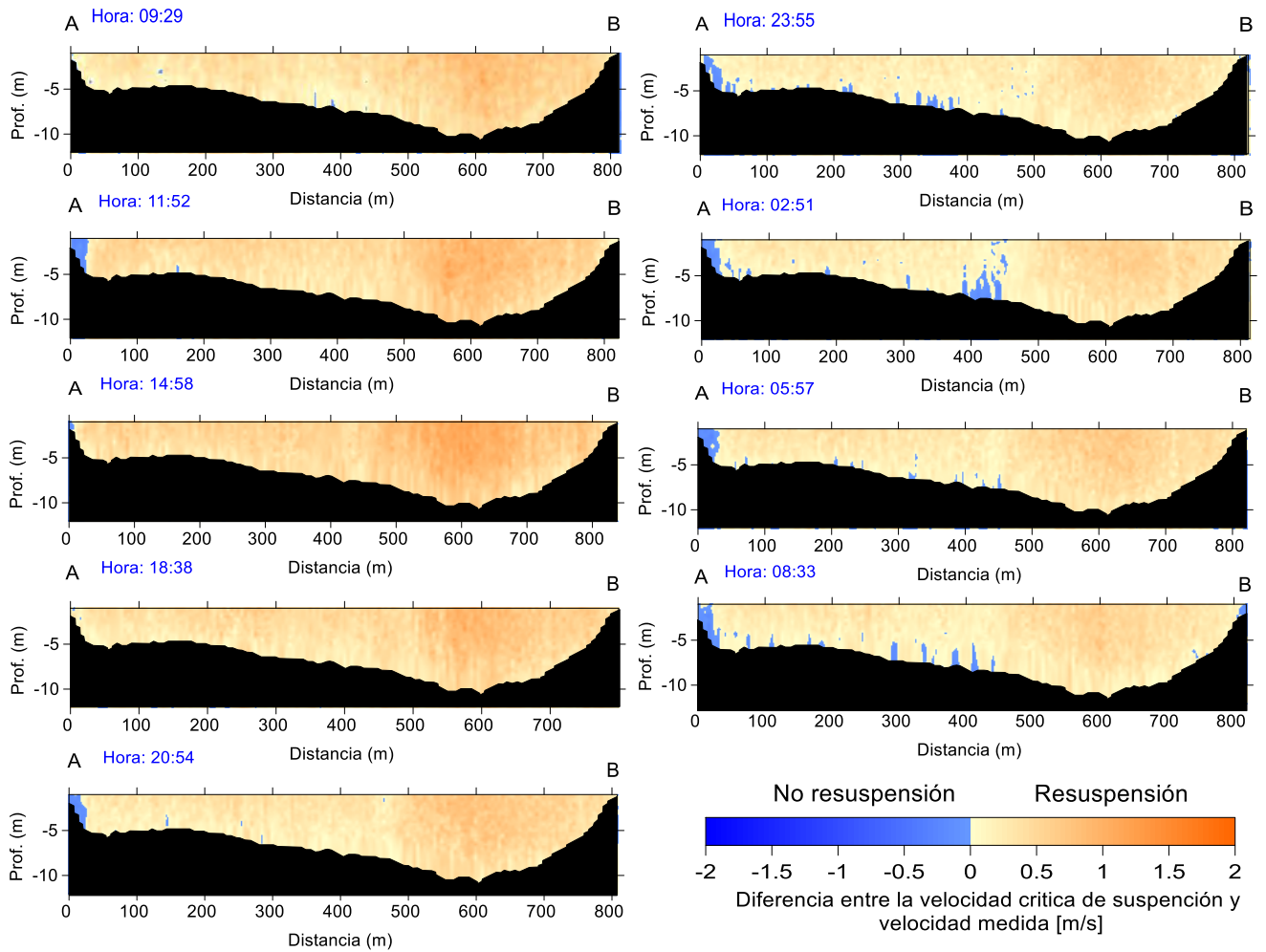
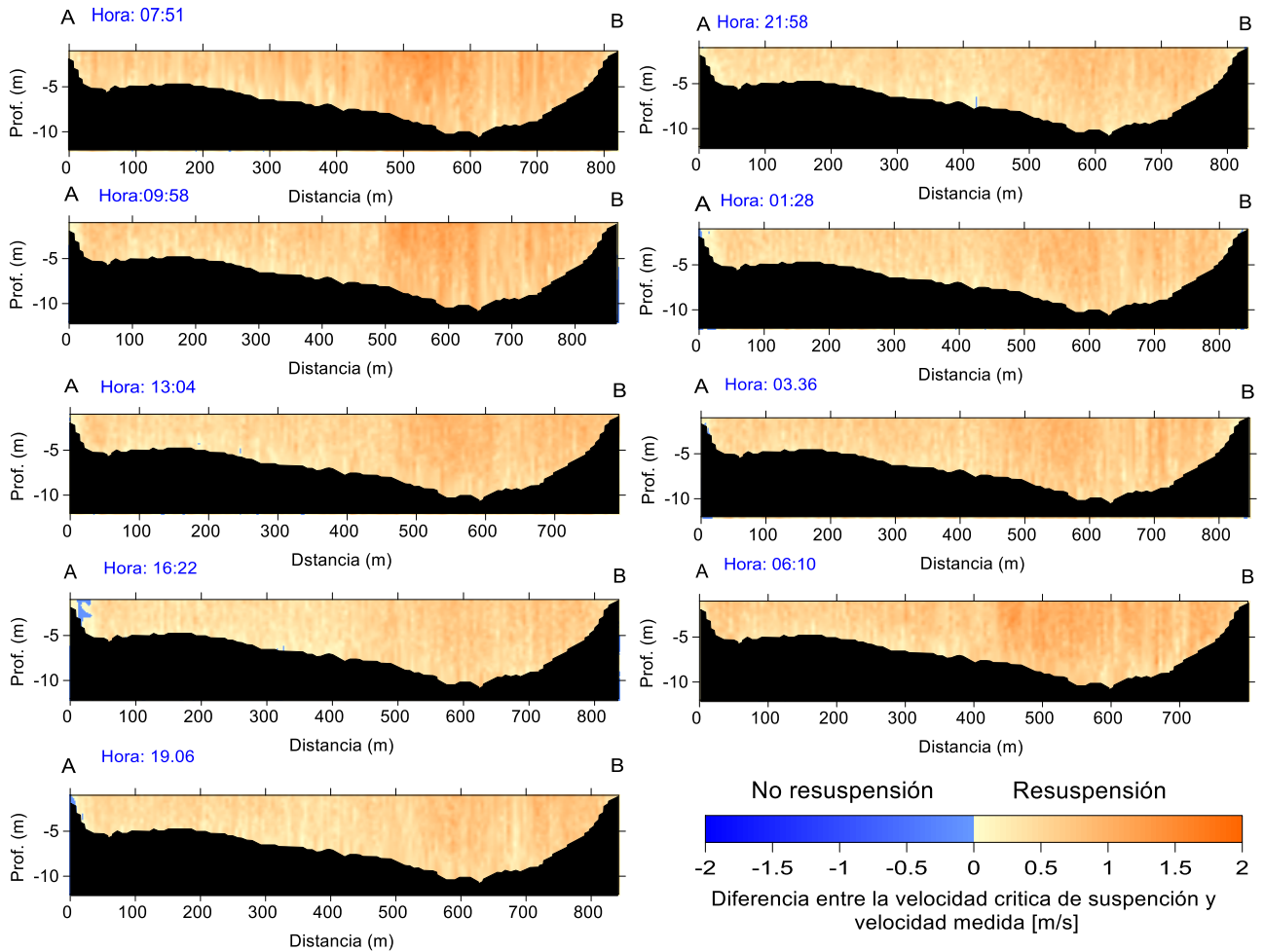


Figura 8.19. Diferencia de velocidades medidas y las velocidades críticas  $u_{cr,s}$  para determinar presencia de resuspensión de sedimentos del lecho del río, septiembre 2011.



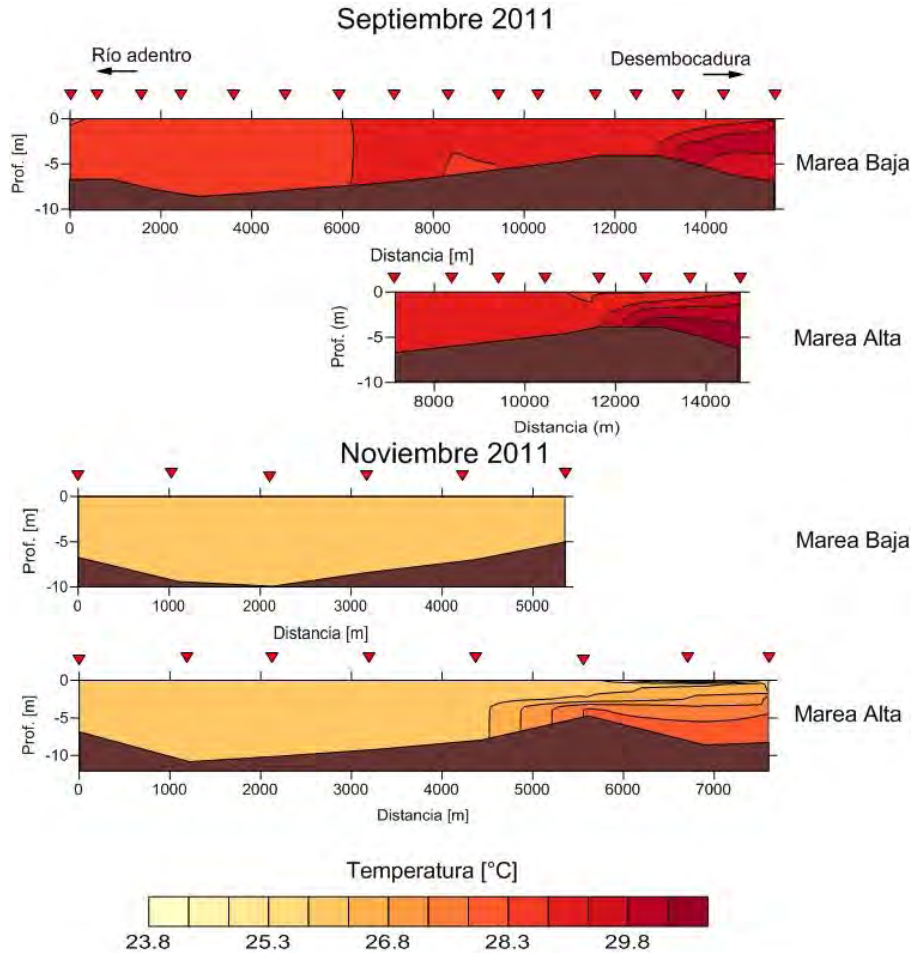
*Figura 8.20. Diferencia de velocidades medidas y las velocidades críticas  $u_{cr,s}$  para determinar presencia de resuspensión de sedimentos del lecho del río, noviembre 2011.*

### 8.9 Distribución de parámetros físicos en el Río Grijalva-Usumacinta

Se midieron los parámetros físicos de temperatura salinidad en septiembre (5-6) y noviembre (12-13) de 2011, en la sección transversal en la que se hicieron las mediciones con ADCP y a lo largo de una sección longitudinal (figura 7.2) que llegó hasta la zona de mezcla entre el agua continental y el agua de mar. A continuación, se presentan las distribuciones y características de cada uno de los parámetros medidos y el parámetro de densidad ( $\sigma_t$ ), calculado a partir de estos. Cabe mencionar que, para motivos de la descripción, las gráficas de las secciones están ordenadas progresivamente en tiempo, por lo que coinciden con instantes diferentes del ciclo completo de marea presente durante los días de medición (figura 8.1).



Referente a la distribución de la sección longitudinal, se presentó un gradiente en la temperatura en el extremo que corresponde a la zona de la desembocadura del río donde las mayores temperaturas estuvieron hacia la boca. En las dos fechas de medición, se observó que este gradiente se desplaza hacia el interior del río durante la marea llanante. La comparación de la temperatura entre ambas fechas mostro que disminuyó en noviembre de 2011 (figura 8.22).



▼ - Estaciones de muestreo

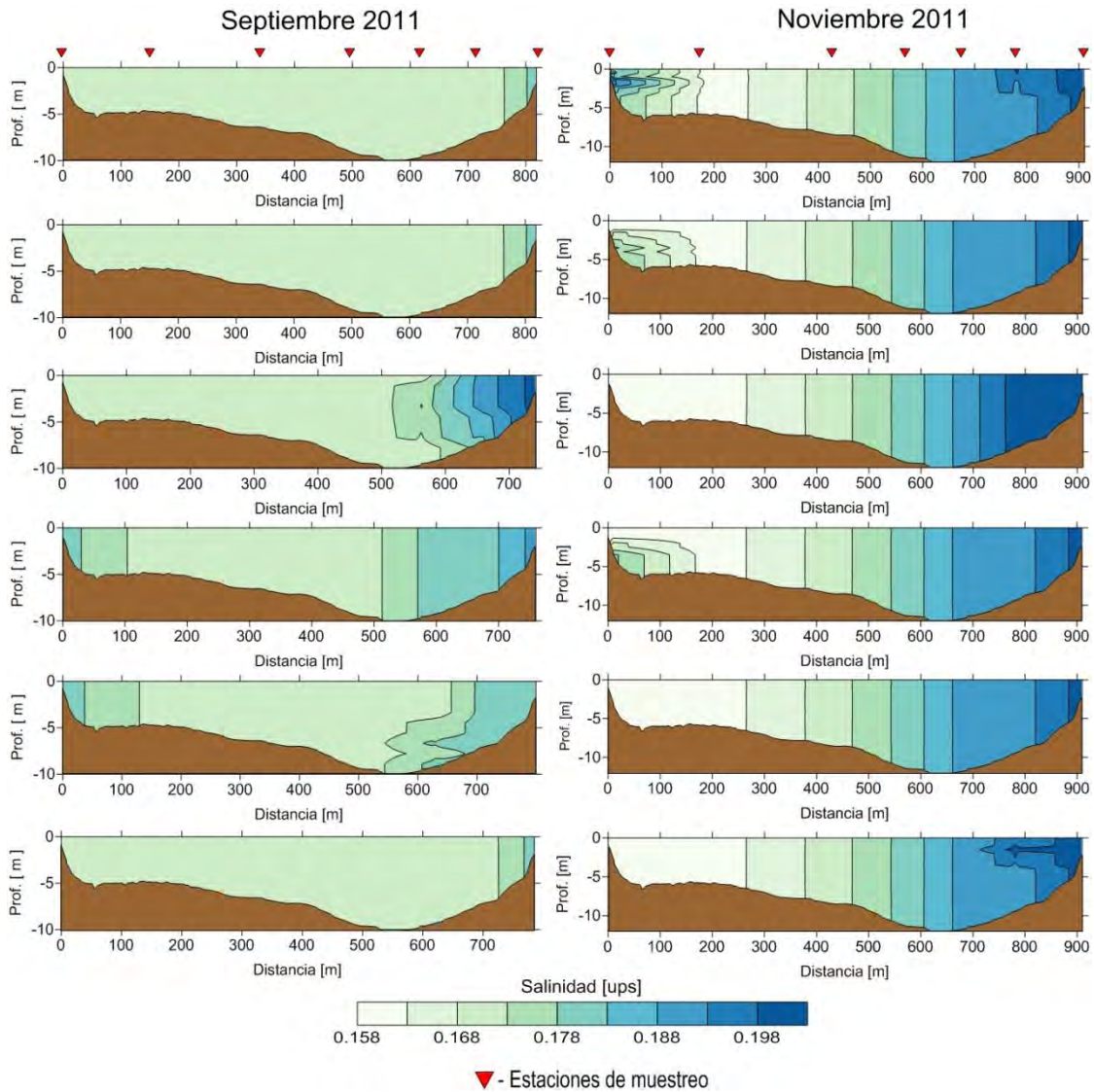
Figura 8.22. Distribución de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la sección longitudinal en septiembre y noviembre de 2011.

### Salinidad

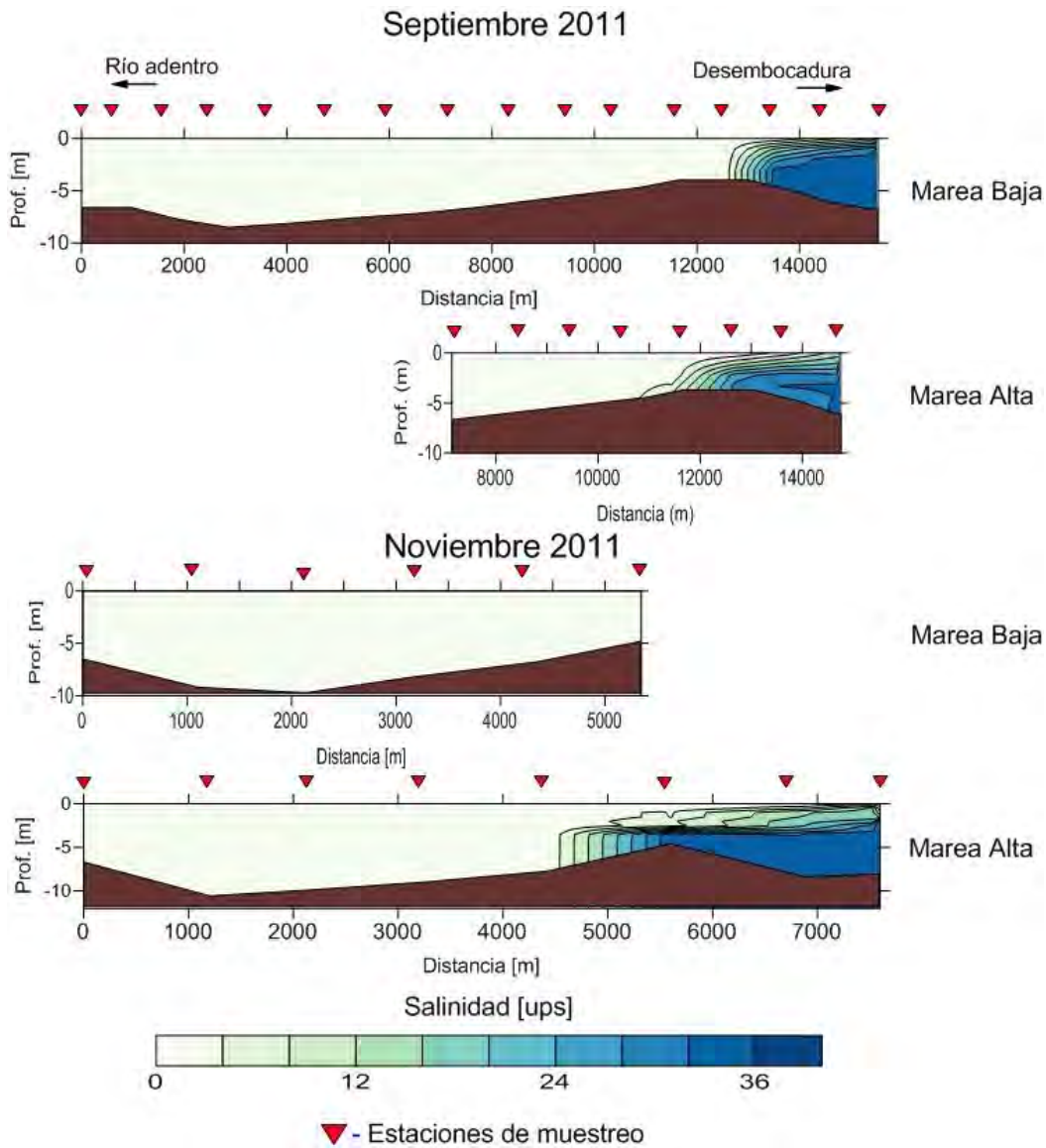
En lo que respecta a la salinidad a lo largo de la sección transversal, se midieron valores correspondientes al agua continental (dulce) con valores de 0.15 a 0.2, aunque el intervalo de valores es muy pequeño, se pudo observar una graduación que va de valores

menores en la margen izquierda a mayores en la margen derecha del río. En la comparación las dos fechas de medición, en septiembre predominaron las cantidades bajas y en noviembre no hay una predominancia (figura 8.23).

En la sección longitudinal se observó al igual que en la temperatura, un gradiente hacia la parte de la boca, desde una salinidad de 0 hasta 35 en una corta distancia, lo que supone que corresponde a la zona de contacto de agua continental (dulce) y agua de mar. Esta zona de contacto tiene una forma de cuña donde las salinidades más altas están en la parte inferior (figura 8.24).



**Figura 8.23. Distribución de salinidad en la sección transversal en septiembre y noviembre de 2011.**



*Figura 8.24. Distribución de salinidad en la sección longitudinal en septiembre y noviembre de 2011.*

### **Sigma T**

Con los parámetros de salinidad, temperatura y presión (medida por la sonda multiparámetro) se calculó el parámetro de densidad (sigma-t), mediante la Ecuación de Estado (TEOS, 2010). A lo largo de la sección transversal los valores fueron pequeños con magnitudes de 0.122 y 0.164 ( $\text{kg/m}^3$ ) (figura 8.25).

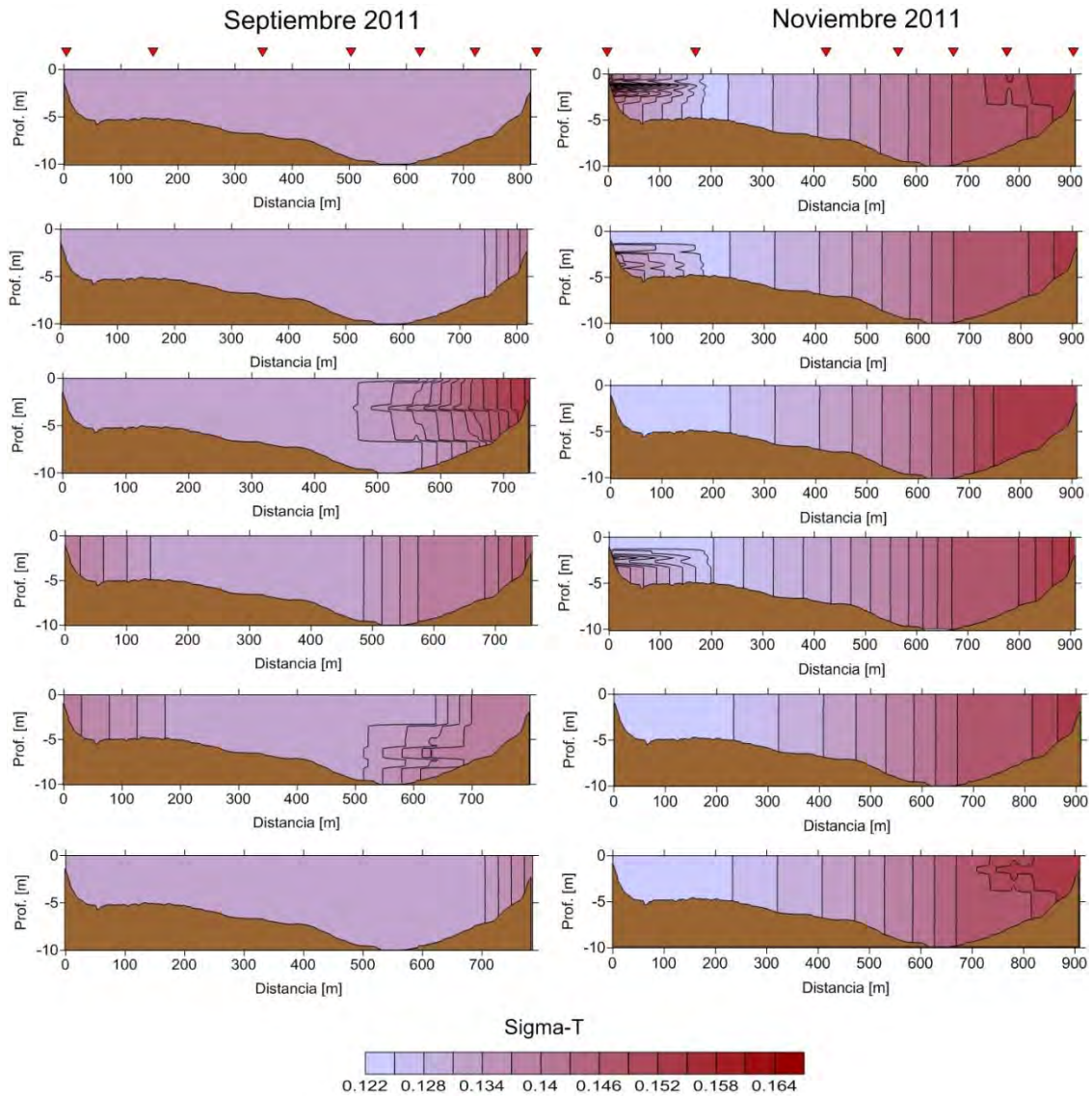
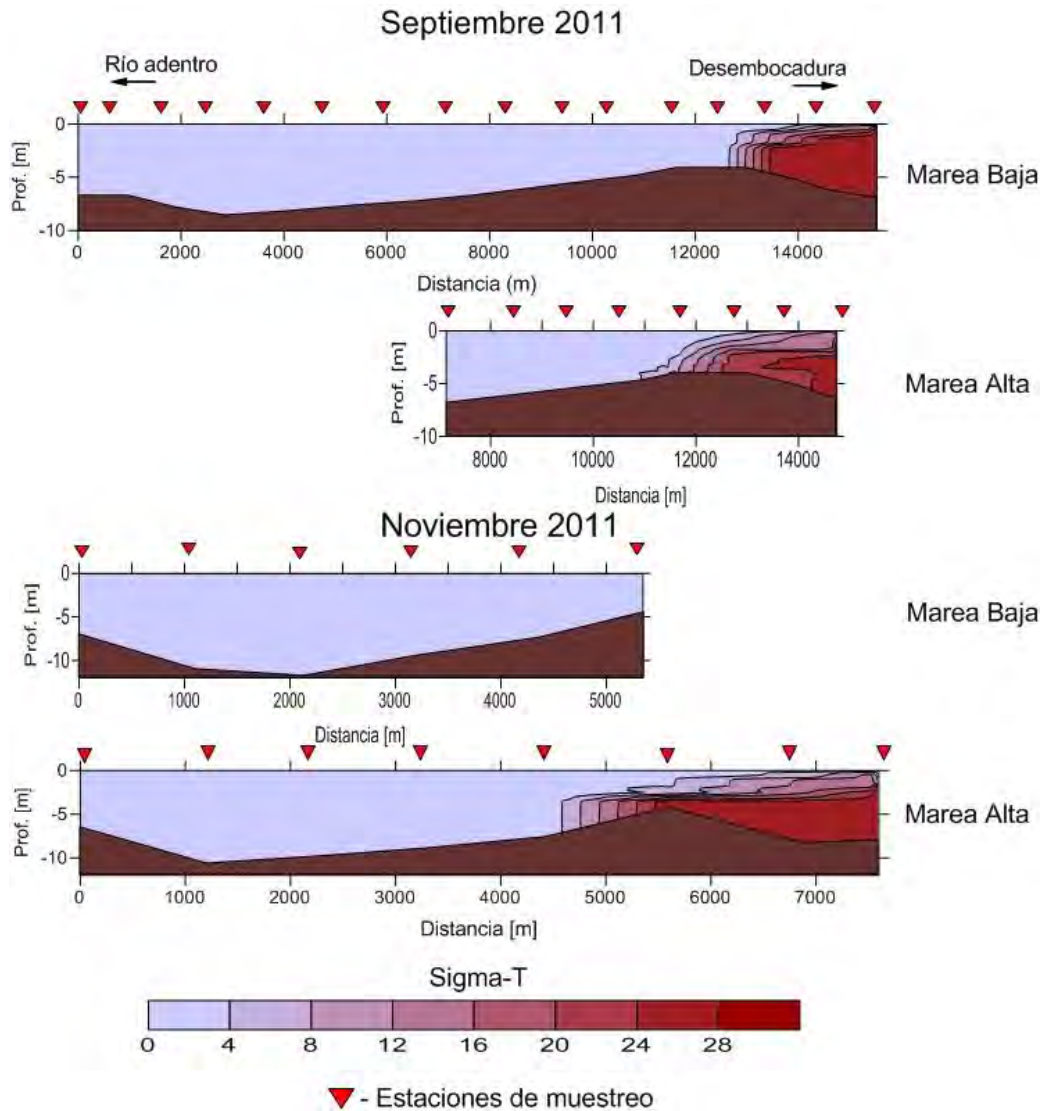


Figura 8.25. Distribución de sigma-t ( $\text{kg/m}^3$ ) en la sección transversal en septiembre y noviembre de 2011.

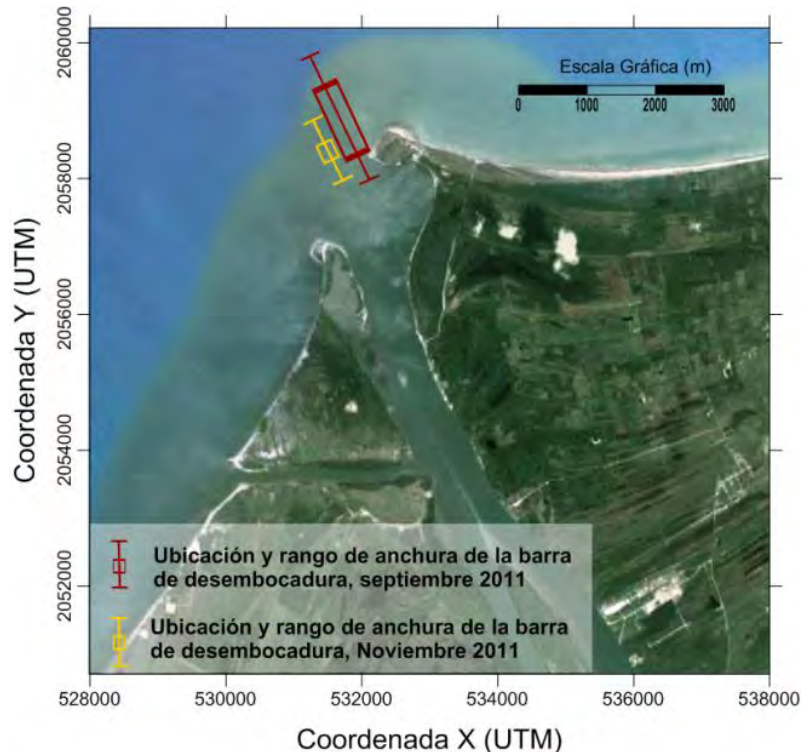
Si bien en la sección transversal los valores fueron pequeños y de poca variabilidad, en la sección longitudinal se observó el mismo gradiente que en la temperatura y salinidad, que cambió de magnitudes de 0 a 28, y mostró de igual manera una forma de cuña donde los valores de sigma-t menores están por encima de los mayores, lo que es una distribución típica de la densidad (figura 8.26).





*Figura 8.26. Distribución de sigma-t ( $\text{kg/m}^3$ ) en la sección longitudinal en septiembre y noviembre de 2011.*

El relieve del fondo de la sección longitudinal mostró que donde se generan los gradientes se encuentra un promontorio en el fondo (Barra) (figuras 8.22, 8.24 y 8.26). Esta barra varió en anchura, en septiembre de 2011 tuvo en su parte más elevada con aproximadamente 2 km de anchura y en noviembre de 2011 una anchura para la misma parte de alrededor de 1 km. Esta anchura se estimó de acuerdo a las estaciones de monitoreo que registraron menor profundidad (el espaciamiento de las estaciones fue de aproximadamente 1 km), y fueron dos estaciones para el monitoreo de septiembre y una para el de noviembre. La ubicación de la barra para ambas fechas fue similar (figura 8.27).



*Figura 8.27. Ubicación y anchura de la barra de la desembocadura del río Grijalva-Usumacinta en septiembre y noviembre 2011.*

### **8.10 Análisis de precipitación y caudal de los años 2010 y 2011 en la cuenca del Río Grijalva-Usumacinta**

Las gráficas de precipitación mostraron lluvias más frecuentes e intensa en los meses de julio – octubre y menores de marzo – junio, un comportamiento típico (Yáñez Arancibia y Sánchez-Gil, 1983).

En 2010, en la cuenca, las precipitaciones alcanzaron valores máximos alrededor de 160 mm a partir de la mitad del mes de junio hasta principios del mes de noviembre. En general en estos meses se intensificaron las lluvias y para la fecha del monitoreo ya se tenía el efecto de aproximadamente 4 meses previos de lluvia intensas (figura 8.28 a). Para el año 2011 las precipitaciones mayores fueron cercanas a los 100 mm, aunque a partir del mes de julio se incrementaron las lluvias en la región, fue hasta los meses de septiembre y octubre que ocurrieron las de mayor intensidad. Para el monitoreo de septiembre se tiene el efecto de lluvias moderadas ocurridas en los meses previos de julio y agosto y, para el monitoreo de noviembre ya se tenía el efecto de las lluvias más

intensas de ese año (figura 8.28 b). De la comparación de los dos años, se observó que en 2010 se tuvieron más precipitaciones y de mayor intensidad.

Los caudales registrados por las estaciones hidrométricas de la cuenca del Río Grijalva-Usumacinta muestran un comportamiento anual similar al de las precipitaciones con gastos medios mayores en los meses de julio a octubre-noviembre y menores en los meses de marzo a junio. Para la fecha de monitoreo del año 2010 (11-12 de octubre) el periodo de mayor caudal en el año había pasado días antes con gastos medios que no superarón los 2000 m<sup>3</sup>/s a excepción de la estación Boca del Cerro que registró gastos medios diarios de 7500 m<sup>3</sup>/s aproximadamente (figura 2.29a). Mientras que para el monitoreo del mes de septiembre de 2011 (días 5-6) comenzaba un intervalo donde los caudales disminuyeron y aún no se habían registrado los gastos máximos de este año. En la fecha del monitoreo de noviembre de 2011 (días 12-13), se presentaba un comportamiento similar al ocurrido en el monitoreo de octubre de 2010, presentándose en días previos los gastos máximos con valores medios máximos de 2000 m<sup>3</sup>/s, exceptuando la estación Boca del Cerro que registró gastos máximos de 7000 m<sup>3</sup>/s aproximadamente.

Cabe mencionar que la estación Boca del Cerro fue la única estación sobre el cauce del río Usumacinta con registros de gastos medios para estos años. Además, donde se ubica esta estación se tiene más de la mitad de su longitud aguas arriba, con el aporte de los escurrimientos de su cuenca alta entre Guatemala y México (figura 7.5). Lo que se refleja en mediciones de gasto medio superiores a los registrado por las estaciones, que se encuentran en los ramales del río Grijalva.

De acuerdo a los registros de precipitación y gastos medios en la cuenca del río Grijalva - Usumacinta, los caudales tienen una relación directa con las precipitaciones, ya que siguen el mismo ciclo anual y cuando se presentaron precipitaciones más intensas, como lo fue en el año 2010 respecto al año 2011, los caudales también fueron mayores (figuras 2.28 y 2.29).

*Determinación de la cantidad de sólidos suspendidos en la desembocadura del cauce del río Grijalva-Usumacinta, Tabasco, México*

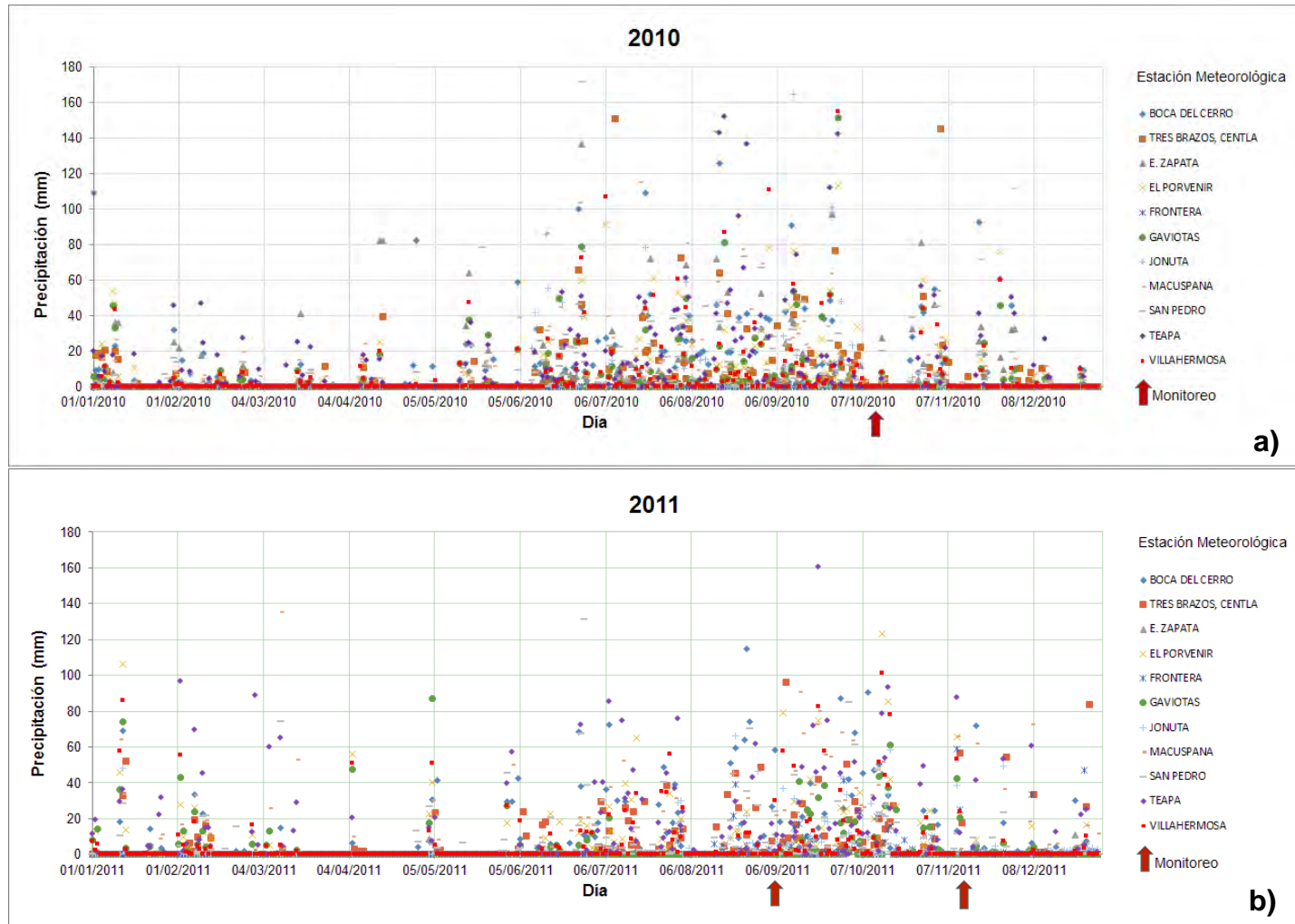


Figura 8.28. Datos diarios de precipitación mm en la cuenca del río Grijalva-Usumacinta, 2010-2011.

*Determinación de la cantidad de sólidos suspendidos en la desembocadura del cauce del río Grijalva-Usumacinta, Tabasco, México*

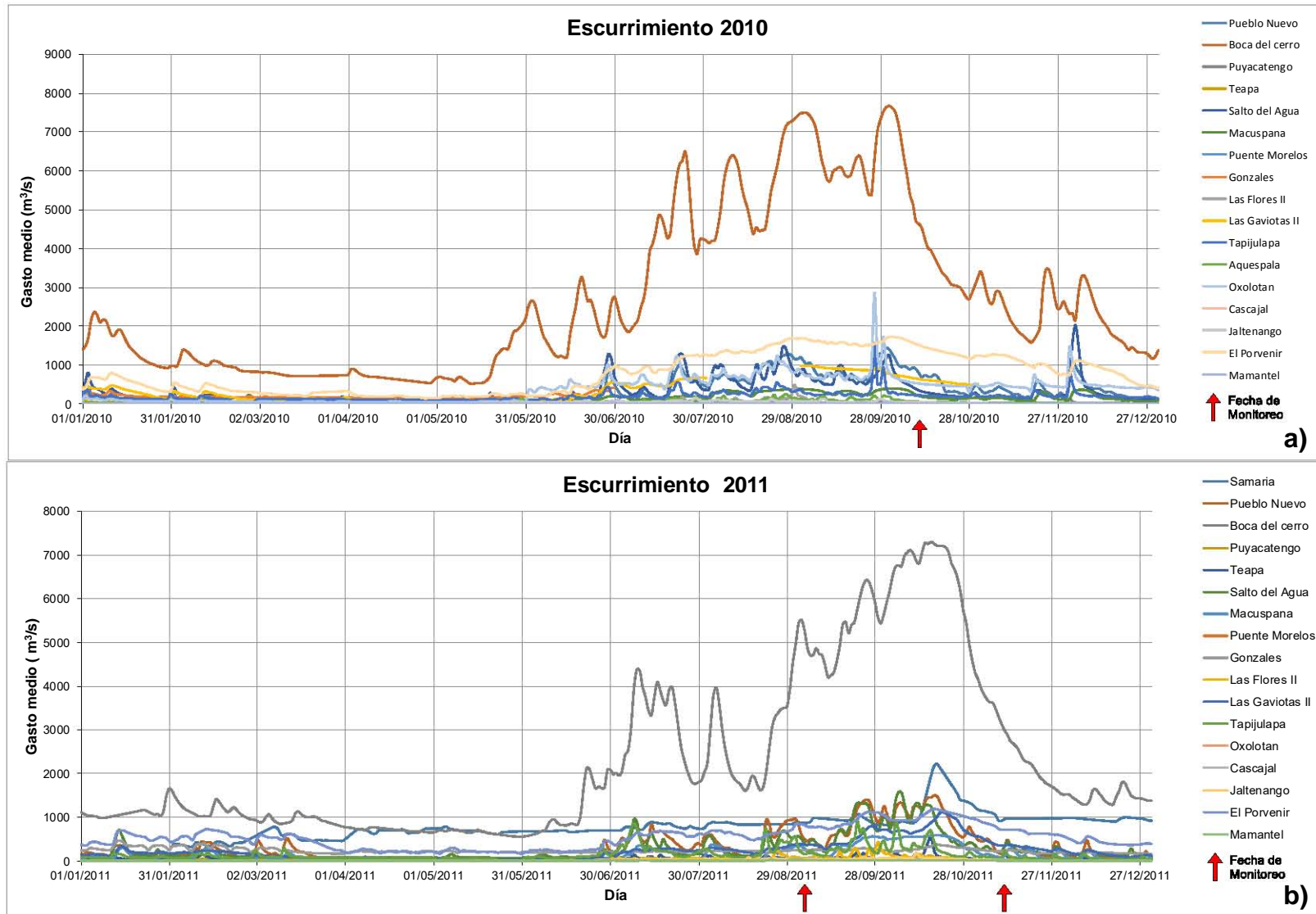


Figura 8.29. Datos diarios del caudal en la cuenca del río Grijalva-Usumacinta, 2010-2011.

## **9. DISCUSIÓN**

Las velocidades de las corrientes del río Grijalva-Usumacinta cerca de la desembocadura, están influenciadas por el régimen de marea, por lo cual, hay un incremento durante el reflujó de la marea y disminuyen durante el flujo de la marea, las variaciones se dan gradualmente conforme se producen los cambios del ciclo de mareas. Dado que el área de la sección transversal es la misma, el caudal está principalmente en función de las velocidades; por lo tanto, no es constante, varía de acuerdo a las magnitudes de la velocidad de la corriente presente de acuerdo a la fase de marea en cada instante. Las variaciones de las velocidades de un monitoreo a otro (octubre de 2010, septiembre y noviembre de 2011), respondieron principalmente a la presencia de una mayor o menor ocurrencia de precipitaciones y a su intensidad, que produjo directamente un incremento o decremento en los caudales de la red de drenaje fluvial de la cuenca.

El análisis realizado de las precipitaciones y caudales dentro de la cuenca del río Grijalva-Usumacinta explican la causa por la cual en octubre de 2010 y noviembre de 2011 los caudales medidos fueron mayores a los de septiembre de 2011, ya que ambos monitoreos corresponden al final del periodo donde se presentan las precipitaciones y se tienen los escurrimientos más intensos en la cuenca, mientras que en septiembre de 2011 aun no ocurría o empezaba el periodo más intenso del ciclo anual de precipitaciones y escurrimientos. Este análisis también muestra que, debido a que las precipitaciones, y por ende, los escurrimientos en la cuenca, fueron más intensos en 2010 respecto a 2011, los caudales medidos en la desembocadura en octubre 2010 fueron mayores a los medidos en noviembre de 2011, aunque ambos se realizaron al final del periodo de mayor precipitación y escurrimiento del ciclo anual.

Los valores de los caudales medidos concuerdan en magnitud con lo reportado por otros trabajos en los que reportan un volumen de escurrimiento medio de 46805 millones de m<sup>3</sup>/año para el río Grijalva y de 58396 millones de m<sup>3</sup>/año para el río Usumacinta (INE, 2008), valores equivalentes a 1484.7 m<sup>3</sup>/s para el río Grijalva y 1851.7 m<sup>3</sup>/s para el río Usumacinta. La zona de estudio comprende la parte donde ambos cauces se han unido, y de la suma de los valores reportados para ambos ríos, se obtuvo un valor del volumen de escurrimiento medio de 3335.9 m<sup>3</sup>/s. La Comisión Nacional del Agua (Conagua) en 2011 reportó un volumen de escurrimiento medio anual para el río Grijalva-Usumacinta de

115536 millones de m<sup>3</sup>/año, equivalente a 3663.6 m<sup>3</sup>/s, ambos valores se asemejan a los 3903.15 m<sup>3</sup>/s calculados para el monitoreo del mes de septiembre de 2011. Estos valores difieren con los caudales de los meses de octubre de 2010 y noviembre de 2011 con valores de 6238.76 m<sup>3</sup>/s y 5268.3 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Esto debido a que los caudales reportados son valores medios anuales los cuales incluyen los escurrimientos menores de los meses de estiaje (marzo – junio) de un año típico de precipitaciones. Además, las fechas de estos dos monitoreos corresponden al final de la temporada donde ocurren las precipitaciones más intensas (Yáñez Arancibia y Sánchez-Gil, 1983).

El modelo de regresión que relaciona el logaritmo base 10 de las concentraciones de sólidos suspendidos ( $\log_{10}CSS$ ) con un intervalo de confianza del 95% ( $\alpha=0.05$ ), tuvo un valor de correlación bajo ( $r=0.59$ ), pero significativo dado que el valor de  $p$  fue de 0.0125 ( $p < \alpha=0.05$ ). Además, el modelo cumple los supuestos del modelo de regresión lineal que son las condiciones necesarias que garantizan que el modelo es válido. Estos supuestos son: Linealidad, la variable dependiente ( $\log_{10}CSS$ ) es la suma de un conjunto de elementos: el origen de la recta, una combinación lineal de variables independientes y los residuos ( $y = a + b_1x_1 + \dots + b_nx_n + E$ ). Normalidad, para cada valor independiente los residuos se distribuyen normalmente con media cero. Homocedasticidad, para cada valor independiente la varianza de los residuos es constante. Independencia los residuos son independientes, muestran aleatoriedad (Díaz, 2005). Esto se ratifica con el intervalo de las concentraciones estimadas para septiembre de 2011 el cual presentó valores mínimos menores a 0.1 y máximos de 0.3 gr/l (figura 8.15); intervalo de valores semejante al de las concentraciones medidas de las muestras de agua que se tomaron en esta fecha (tabla 8.2), lo que significa que el modelo está calibrado.

El modelo de regresión lineal obtenido es similar a lo reportado en trabajos previos para la determinación de sólidos en suspensión a partir de registros acústicos con ADCP en otros sitios (Bellón *et al.*, 2010; Yong y Voulgaris, 2001; Wall *et al.* 2006) e incluso en trabajos de estimación de biomasa zooplanctónica con ADCP (Salas de León *et al.*, 2005) en los cuales la línea de mejor ajuste entre los valores de retrodispersión y las concentraciones de sólidos en suspensión (obtenidos de muestras de agua o sensores ópticos de turbidez OBS) es la descrita por una función exponencial. En estos trabajos previos, se han alcanzado valores  $r^2$  más altos ( $r^2=0.90$ ) que el obtenido en este estudio ( $r^2 = 0.349$ ), esto debido a una mayor cantidad de muestras o mediciones de turbidez.

De acuerdo con los valores estimados de CSS, el río Grijalva-Usumacinta en su parte final tuvo un intervalo de concentraciones de 0 hasta 1 g/l que varió en el tiempo y espacio, y tuvo en promedio una concentración de 0.13 g/l. Estas variaciones tienen correspondencia con los cambios en las magnitudes de la velocidad de la corriente; que, a su vez están influenciadas por las mareas y por el volumen de los escurrimientos, el cual se rige por la cantidad de precipitación en la cuenca. Esta correspondencia con la velocidad se corrobora con los resultados obtenidos para determinar la presencia de resuspensión de sedimentos del fondo del río, dado que la resuspensión se presenta cuando las velocidades de la corriente son mayores a la velocidad crítica de suspensión (Van Rijn, 1993). Por lo tanto, en los tiempos en donde hay resuspensión de sedimentos en todo el fondo del cauce se tienen mayores CSS, como es el caso de los monitoreos realizado en octubre de 2010 y noviembre de 2011; sin embargo, cuando la resuspensión es parcial o menos intensa; por ejemplo, en el monitoreo realizado en septiembre de 2010 o durante el flujo de marea, las concentraciones son menores.

Los volúmenes de sedimentos descargado por el río Grijalva-Usumacinta hacia el mar estimados a partir de las CSS y los caudales calculados, tuvieron valores entre 219 y 1500 kg/s. Como el sedimento está compuesto principalmente de materia inorgánica de origen terrígeno (cuarzo y feldespatos principalmente), se puede asumir una densidad del sedimento  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$  (Van Rijn, 1993); así entonces, estos valores son equivalentes a  $214.1 \times 10^3$  y  $1467.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mes}$ , cantidades que están dentro del intervalo de volúmenes de sedimentos reportados para los meses de septiembre octubre y noviembre de los registros históricos de las estaciones hidrométricas del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (anexo 3), que están ubicadas aguas arriba en el cauce de los ríos Grijalva y Usumacinta (figura 7.5) y que cuentan con equipo de medición de esta variable.

La distribución espacial que presenta la CSS se debe a la presencia de la isla localizada a unos cientos de metros aguas arriba del sitio de monitoreo, donde se generan una pluma de sedimentos posterior a la isla (figura 8.17), la cual concuerda con la zona de la sección transversal en que se tuvo la mayor concentración de sólidos en suspensión (figuras 8.14, - 8.16), dicha pluma de sedimento se debe principalmente al efecto del meandro presente en esta zona. La teoría de meandros; en la cual se establece el concepto de “Flujo helicoidal en meandros” (Einstein y Li, 1958; Garde y Ranga, 1985), donde la fuerza centrífuga que actúa a lo largo del escurrimiento en un meandro produce sobre elevación



en la superficie libre del agua sobre la margen cóncava y un descenso en la margen convexa (Thomson 1876). Esta sobre-elevación asociada a una pérdida de energía a lo largo del fondo, produce un flujo helicoidal cuya velocidad transversal mueve la carga del fondo hacia la margen convexa donde se acumula (Rivas *et al.*, sin año; Leliavsky, 1955).

La caracterización de los parámetros físico del agua indican que, dado las concentraciones de salinidad medidas en la sección transversal de la porción del río en donde se realizaron los monitoreos, se tuvo exclusivamente agua dulce y que la interacción con el agua de mar se da hasta la boca del río, donde se observó la cuña salina producida por la diferencia de densidades de acuerdo a los valores de sigma-T, desplazándose el agua dulce por encima del agua de mar, comportamiento típico de cuña salina debido a que el agua de mar es más densa que el agua dulce ya que presenta concentraciones de salinidad mayores. Donde se ubicó la cuña salina el relieve del fondo describe un montículo, a esta morfología se le conoce como barra de desembocadura (Lugo, 2011). Esta se genera por deposición del sedimento producido por alguno o varios de los siguientes procesos: por floculación de las arcillas cargadas negativamente cuando entran en contacto con las aguas saladas ricas en cationes positivos, o por acreción de partículas arcillosas al final del refluo. También la mezcla de las aguas dulces y marinas provoca reacciones químicas, que pueden influir sobre la concentración de iones metálicos o la precipitación de elementos minerales y por la dispersión de la energía y decantación debido a la interacción del caudal del río con el mar (Holmes y Holmes, 1987). Este último proceso explica porque en septiembre la barra tuvo mayor anchura que en noviembre de 2011; ya que, la energía de la corriente y del mar fueron menos intensas en septiembre lo que generó una mayor sedimentación en la desembocadura. En cambio, en noviembre se registró un mayor caudal y se observó un incremento en la energía de mar por la presencia de “nortes”, esto disminuyó la sedimentación e incluso provocó la remoción del sedimento del fondo.

## **10. CONCLUSIONES**

La determinación de la concentración de sólidos suspendidos mediante el empleo de registros de retrodispersión acústica, es una manera indirecta de cuantificar las concentraciones con resultados fiables. Además de que este método permite cuantificar las diferentes concentraciones en toda el área de una o varias secciones transversales.

Dado que la aplicación principal del perfilador acústico de efecto Doppler es medir la velocidad y dirección de la corriente, esta información en conjunto con la estimación de las concentraciones de sólidos suspendidos en una sección, permite obtener el gasto de los sedimentos que transporta un caudal o flujo en determinado tiempo.

El modelo numérico establecido cumplió con los criterios matemáticos que determinan su validez para estimar las concentraciones de sólidos suspendidos (CSS) a partir de la retrodispersión acústica (Bs) ( $\log_{10}CSS = -5.8053 + 0.0497 * Bs$ ).

En este estudio se obtuvo una correlación baja para un intervalo de confianza del 95% ( $\alpha=0.05$ ), y fue atribuido al número de muestras de agua y control en la toma de estas, por lo que se recomienda para futuros trabajos que empleen esta metodología incrementar el número de muestras y tener mayor control de la posición y profundidad en que se tome la muestra.

La dinámica del río cerca de la desembocadura está regida por la dinámica del mar y el aporte de agua por escurrimientos en su cuenca, que causan variación del caudal del río con la disminución o aumento de la corriente, en relación al ciclo de marea y al mayor o menor aporte de agua de la cuenca.

El contacto entre el agua del río con el agua de mar genera una cuña salina, en la cual, dependiendo de la energía de la corriente y del mar, producen condiciones propicias para la sedimentación o resuspensión de los sedimentos. Esto hace que la barra de desembocadura tenga variaciones en sus dimensiones de una temporada a otra.

## REFERENCIAS

- Apha, Awwa, Aplf. (1992). *Metodos Normalizados para el Análisis de Agua Potable y Residuales* (17 ed.). New York: American Public Health Association Enc.
- Bagnold, R. (1966). An Approach to the Sediment Transport Problem From General Physics. *Geological Survey Professional Paper*, 422(I), 137.
- Bellón, D., Pedocchi, F., & Piedra-Cueva, I. (2010). Determinación de Concentraciones de Sedimentos en Suspensión a Partir de Perfiladores de Corriente Acústicos en la Costa de Montevideo, Uruguay. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta del Este*, (pág. 10). Uruguay.
- Comisión Nacional del Agua. (2011). *Estadísticas del Agua en México*. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno Federal.
- Comisión Nacional del Agua. Banco Nacional de Datos del Aguas Superficiales. Estaciones Hidrometricas, Región 30. (s.f.). Recuperado el Febrero de 2015, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>.
- Cussioli, M. C., Bryan, K. R., Pilditch, C. A., & De Lange, W. P. (2015). Dispersal of dredging plumes in Tauranga Harbour, New Zealand: A field study. *Australian Coasts and Ports 2015*, (págs. 222-228).
- Defendi, V., Kovacevic, V., Arena, F., & Zaggia, L. (2010). Estimating sediment transport from acoustic measurements in the Venetian Lagoon inlets. *Continental Shelf Research*, 30(8), 883-893.
- Deines, K. L. (1999). *Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers*. RD Instrument, San Diego, CA.
- Díaz, C. J. (2005). *Estadística con Programación, Cap 9.3 Análisis de Residuales*. Departamento de Matemáticas, Universidad de Puerto Rico en Aguadilla.
- Einstein, A., & Li, H. (1958). Secondary currents in straight channels. *Earth & Space Science News*, 39(6), 1085-1088.
- Erbe, C. (2011). *Underwater Acoustics: Noise and the Effects on Marine Mammals* (3rd ed.). Jasco Applied Sciences.
- Friedman, G. M., & Sanders, J. E. (1978). *Principles of Sedimentology*. John Wiley & Sons Inc.
- Garde, R. J., & Ranga Raju, K. G. (1985). *Mechanics of sediment Transportation and alluvial stream problems* (2nd ed.). New Delhi: Wiley Eastern.

- Gartner, J. W. (2004). Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211(3-4), 169-187.
- Ghaffari, p., Azizpour, J., Noranian, M., Chegini, V., Tavakoli, V., & Shah-Hosseini, M. (2011). *Estimating suspended sediment concentrations using a broadband ADCP in Mahshahr tidal channel*. Obtenido de Ocean Sciences Discussions: <https://www.ocean-sci-discuss.net/8/1601/2011/osd-8-1601-2011.pdf>
- Griggs, R. F. (1906). The Buffalo river: An Interesting Meandering Stream. *Bulletin of the American Geographical Society*, 38(3), 168-177.
- Hamilton, L. J., Shi, Z., & Zhang, S. Y. (1998). Acoustic backscatter measurements of estuarine Suspended cohesive sediment concentration profiles. *Journal of Coastal Research*, 14(4), 1213-1224.
- Hjulstrom, F. (1957). A study of the meander problem. *bulletin of the Institute of hydraulics, Royal Intitute of Technolgy, Stockholm*(51).
- Holmes, A., & Holmes, D. L. (1987). *Geología Física*. Omega.
- Instituto Nacional de Ecología. (2008). *Evaluación de la Vulnerabilidad de los Estados del Sureste de México ante Lluvias Extremas Debidas a la Variabilidad y el Cambio Climatico, Estudio de Caso*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2005). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 10 de Julio de 2010, de <http://mapserver.inegi.org.mx/>
- Islam, M. S., Bonner, J. S., Fuller, C., & Kirkey, W. (2013). Determination of stream discharge, hydrodynamics and sediment transport variation at the estuarine section of the Hudson River and Estuary, NY. *OCEANS 2013-San Diego: An Ocean in common*. San Diego, CA.
- Kim, Y. H., & Voulgaris, G. (2001). Estimation of Suspended Sediment Concentration in Estuarine Environments Using Acoustic Backscatter from an ADCP. 10.
- Kimiaghalam, N., Goharrokhi, M., & Clark, S. P. (2016). Assessment of wide river characteristics using an Acoustic Doppler Current Profiler. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(12).
- Leliavsky, S. (1955). *An introduction to fluvial hydraulics*. London: Constable & Company LTD.
- Lugo, H. J. (2011). *Diccionario Geomorfológico, (Geografía para el Siglo XXI. Serie Textos Universitarios 7)*. México: Instituto de Geografía, UNAM.

- Muñoz-Salinas, E., & Castillo, M. (2015). Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. *Catena*, 127, 270-278.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., Sanderson, D., Kinnaird, T., & Cruz-Zaragoza, E. (2016). Using three different approaches of OSL for the study of young fluvial sediments at the coastal plain of the Usumacinta-Grijalva River Basin southern Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(6), 823-834.
- Neu, H. A. (1967). Transverse flow in a river due to earth's rotation. *Journal of the Hydraulics Division*, 93(5), 149-165.
- Peters, J. J. (2004). *Mediciones 2000-2004 para los estudios de potamología en el Bajo Grijalva*. Presentation, World Meteorological Organization.
- Peters, J. J. (2005). *Hacia un manejo integral del cauce del bajo Grijalva: primera fase. El control de la repartición de los gastos líquidos entre los ríos Samaria y Carrizal*. Presentation, Brussels.
- Rijn, L. C. (1993). *Principles of the sediment transport in rivers, estuaries and coastal*. Aqua Publications.
- Rivas, H., Molina, J. P., & Lopez, M. G. (Sin año). *Manual de prácticas, Ingeniería de Ríos 9o semestre*. Laboratorio de Ingeniería Civil, Laboratorio de Hidráulica. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Rocha, F. A. (2010). *Las Causas de la Formación de los Meandros. Traducción del artículo de Albert Einstein titulado: Die Ursachen der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes Fluviales y la llamada Ley de Baer*.
- Rothwell, R. G. (1989). *Minerals and mineraloids in marine sediments*. London: Elsevier Applied Science.
- Salas de León, D. A., Monreal, M. A., & Galarza, M. J. (2005). Estimación de la biomasa zooplanctónica en zonas costeras usando un perfilador acústico de alta frecuencia. *Ciencia y Mar*, IX(26), 9-18.
- Sánchez, A. (2007). *Origen y evolución de meandros en corrientes naturales*. México: UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.
- SonTek. (2000). *Manual Acoustic Doppler Profile (ADP) Principles of Operation*.
- Sparks, B. W. (1986). *Geomorphology* (3rd ed.). Longman Scientific & Technical.
- Teledyne, RD Instruments. (2007). *"WinRiver II User's Guide", Appendix B - Discharge Measurement Basics*.

- Thomson, J. (1876). On the origin of windings of rivers in alluvial plains with, remarks on the flow of water round bends in pipes. *Proc. R. Soc. Lond*, 25, 5-8.
- Tiron D., L., Provansal, M., Le Coz, J., & Dutu, F. (2014). Contrasted sediment processes and morphological adjustments in three successive cutoff meanders of the Danube delta. *Geomorphology, Elsevier*, 204, 154-164.
- Wall, G. R., Nystrom, E. A., & Litten, S. (2006). *Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the Tidal Hudson River, New York*. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5055.
- Weiss, A., Clark, S. P., Rennie, C. D., Moore, S. A., & Ahmari, H. (2015). Estimation of total suspended solids concentration from ADCP backscatter and hydraulic measurements. *Journal of Hydraulic Research*, 53(5), 670-677.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377-392.
- Wittman, H., & Boss, P. (1938). *Wasser-und Geschiebebewegung in gekrummten Fluss-trecken*. Berlin, Germany: Julius Springer in Berlin.
- Yañez-Arancibia, A., & Sánchez-Gil, P. (1983). Environmental behavior of Campeche Sound ecological system, off Terminos Lagoon, Mexico: Preliminary results. *An. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 10, 117-136.

## ANEXOS

### Anexo 1. Principios del funcionamiento del ADCP

Los registros acústicos con un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés), miden las velocidades del agua usando el principio físico llamado efecto Doppler. Esto es, si una fuente de sonido se mueve en relación con el receptor, la frecuencia del sonido en el receptor se desplaza de la frecuencia transmitida. Dado esto, para medir las corrientes, se observa la reflexión del sonido producida por las partículas en el agua, ya que el cambio en la frecuencia de las partículas es proporcional a la velocidad del agua. (figura 1).

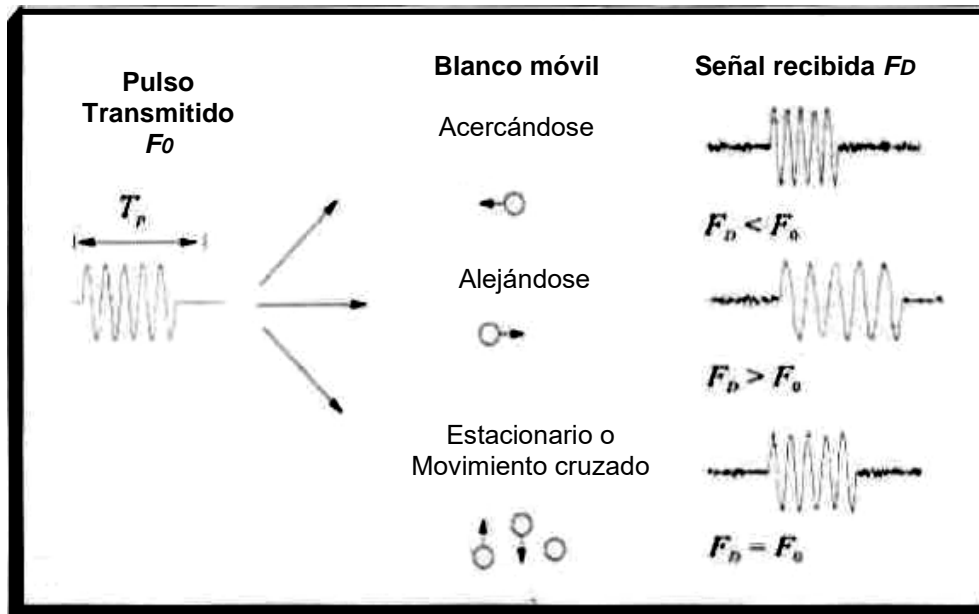


Figura 1. Diagrama que presenta el principio básico de medición de la corriente usando el efecto Doppler (Tomada de Teledyne RD Instruments, 2007).

La figura 1 presenta el principio básico de operación para medir la corriente. El cambio en la frecuencia es calculado por la siguiente ecuación.

$$F_{Doppler} = -2F_{fuente} \frac{V}{C}$$

Donde,

$F_{Doppler}$  – Cambio en la frecuencia recibida

$F_{fuente}$  – Frecuencia del sonido transmitida

$V$  – velocidad relativa de las partículas

$C$  – velocidad del sonido

La velocidad ( $V$ ) representa la velocidad relativa entre la fuente y los dispersores. Si la distancia entre las dos decrece la frecuencia se incrementa, si la distancia se incrementa la frecuencia decrece, si el movimiento es perpendicular a la línea que conecta a los dos, no se produce ningún efecto Doppler.

### Medición monoestática de corriente

La figura 2 presenta la operación básica de la medición monoestática de corriente tal como lo realiza el ADCP. Monoestático significa que el mismo transductor se utiliza como transmisor y receptor, el transductor es diseñado para generar un haz estrecho de sonido, esto es, que genera un pulso corto de sonido a una frecuencia conocida, el sonido viaja a través del agua y se refleja en todas las direcciones por las partículas (sedimentos, pequeños organismos, burbujas), una parte de la energía reflejada viaja a lo largo del eje del transductor y es recibida por el ADCP, que mide el cambio de frecuencia en la señal recibida, el efecto Doppler medido por un solo transductor refleja la velocidad del agua a lo largo del eje de su haz acústico (Figura 2).

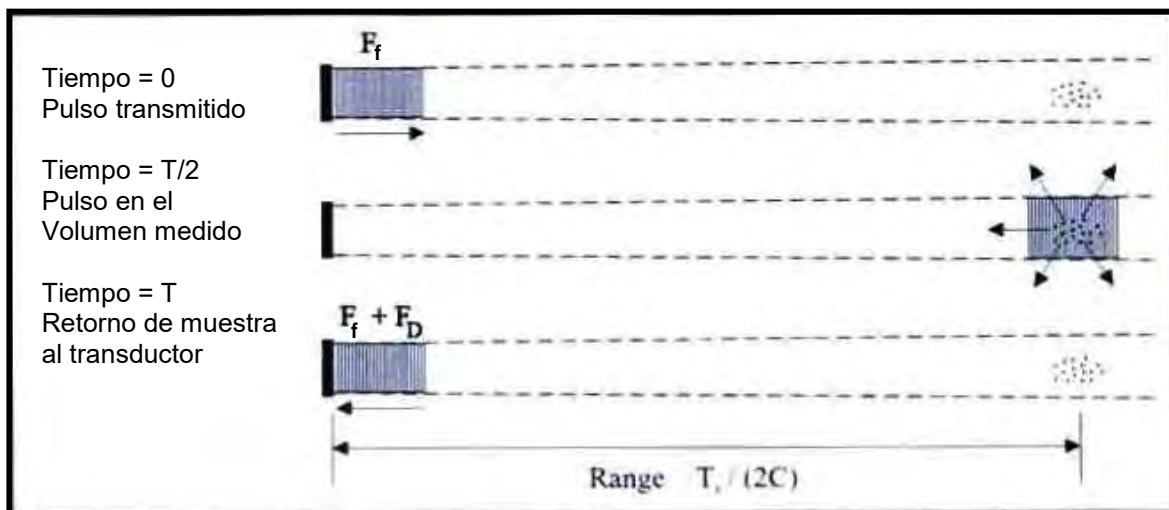
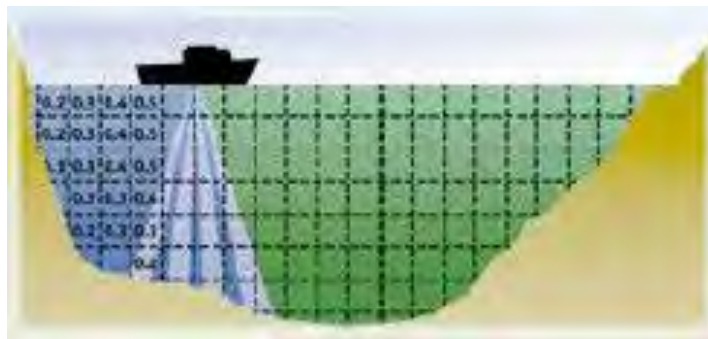


Figura 2. Diagrama que ejemplifica la operación monoestática del ADCP para medir la corriente (Tomada de Teledyne RD Instruments, 2007).



El tiempo transcurrido desde que el pulso se transmite, determina qué tan lejos ha viajado el pulso y especifica la ubicación de las partículas que son la fuente de la señal reflejada; así entonces, mediante la medición de la señal de retorno en diferentes momentos el ADCP mide la velocidad del agua a diferentes distancias del transductor, sin más que cruzar el cauce de una orilla a otra y sin que la trayectoria seguida influya en la medida obtenida.

El perfil de la velocidad del agua se divide en una serie de celdas, en cada celda se representa el promedio de la señal de retorno para un período determinado (Sontek, 2000) (figura 3).



*Figura 3. Diagrama que muestra el seccionamiento en celdas de las velocidades de un perfil a través de un río (Tomada de Teledyne RD Instruments, 2007).*

El software WinRiver II, determina la descarga en un transecto o un canal acumulando las descargas en cada celda, partiendo de la ecuación general para determinar la descarga total a través de una superficie arbitraria (Teledyne RD Instruments, 2007):

$$\iint_S \mathbf{V}_f \cdot \mathbf{n} \, ds$$

Donde,

$Ds$  = diferencial de área

$V_f$  = vector de velocidad media del agua

$n$  = vector unitario normal en un punto en general del perfil

En el caso de una embarcación en movimiento a través de un canal (Figura 4), el área está determinada por la superficie vertical debajo de la ruta seguida. Debido a que el ADCP mide tanto el movimiento de la embarcación (velocidad de ADCP, bottom-track) y la velocidad del agua, podemos cambiar el orden de la integral anterior en el siguiente formulario:

- $Dz$  = diferencial de profundidad
- $Dt$  = diferencial de tiempo
- $V_b$  = vector de la velocidad media de la embarcación
- $T$  = tiempo total de la ruta
- $d$  = profundidad total
- $k$  = vector unitario en la dirección vertical

Entonces:

$$\begin{aligned} ds &= |V_b| dz dt \\ V_f \cdot n &= |V_f| \sin \theta \\ \iint_S V_f \cdot n ds &= \int_0^T \int_0^d |V_f| |V_b| \sin \theta dz dt \\ &= \int_0^T \int_0^d (V_f \times V_b) \cdot k dz dt \end{aligned}$$

La conversión del producto vectorial  $(V_f \times V_b) \cdot k$  a su forma en coordenadas rectangulares (Teledyne RD Instruments, 2007):

$$(V_f \times V_b) \cdot k = F_x B_y - F_y B_x$$

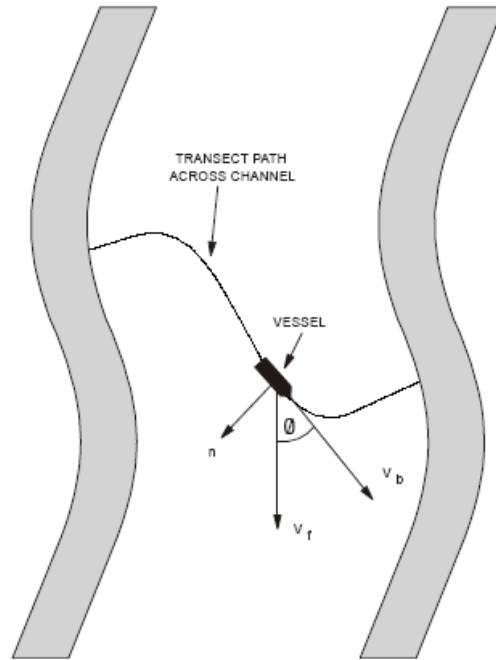
Donde,

$F_x$  = componente transversal del vector de velocidad media del agua

$F_y$  = componente de proa/popa del vector de velocidad media del agua

$B_x$  = componente transversal del vector de velocidad media de la embarcación

$B_y$  = componente de proa/popa del vector de velocidad media de la embarcación



*Figura 4. Diagrama que muestra un transecto a través de un canal y las componentes vectoriales de un punto sobre la trayectoria de la embarcación (Teledyne RD Instruments, 2007).*

## Anexo 2. Configuración del equipo

Modalidad de operación del equipo ADCP (WM12) rango alto de pings

Tiempo entre cada pings (TP000005) 0.05 s

Tamaño en profundidad de la celda 0.25 m

El modo empleado, tiene parámetros establecidos para el tipo de operación realizada, esto es, mediciones de forma dinámica en río grande. (Tabla 1)

*Tabla 1. Configuración empleada para las mediciones realizadas con el ADCP*

<b>Command</b>	<b>Choices</b>	<b>Description</b>
CR1	Sets factory defaults	This is the first command sent to the ADCP to place it in a known state.
CF11110	Flow control	CF11110 selects automatic ensemble cycling, automatic ping cycling, binary data output, enables serial output, and disables data recording.
BA30	Evaluation Amplitude Minimum	Sets the minimum value for valid bottom detection to 30 counts.
BC220	Correlation Magnitude Minimum	Sets minimum correlation magnitude for valid bottom track velocity data to 220 counts.
BE100	Bottom Track Error Velocity Maximum	Sets maximum error velocity for good bottom-track water-current data to 100mm/s.
BP1	Bottom track pings	The ADCP will ping 1 bottom track ping per ensemble.
ES0	Salinity	Salinity of water is set to 0 (freshwater).
EX10111	Coordinate transformations	Sets Ship coordinates, use tilts, allow three-beam solutions, and allow bin mapping to ON.
TE00:00:00.00	Time per ensemble	Ensemble interval is set to zero.
TP00:00.05	Time between pings	Sets the time between pings to 0.05 seconds.
WA50	False Target Threshold Maximum	Sets a false target (fish) filter to 50 counts.
WE1500	Water Track Error Velocity Threshold	Sets the maximum error velocity for good water-current data to 1500mm/s.
WF25	Blank after transmit	Moves the location of the first depth cell 25 cm away from the transducer head
WM12	Water mode	Sets the ADCP to Water Track mode 12.
WN96	Number of depth cells	Number of bins is set to 96

*Determinación de la cantidad de sólidos suspendidos en la desembocadura del cauce del río Grijalva-Usumacinta, Tabasco, México*

---

<b>Command</b>	<b>Choices</b>	<b>Description</b>
WP1	Pings per ensemble	The ADCP will ping 1 water track ping per ensemble.
WS25	Depth cell size	Bin size is set to 0.25 meters
WV175	Ambiguity velocity	Sets the maximum relative radial velocity between water-current speed and WorkHorse speed to 175 cm/s.
WZ005	Mode 5 Ambiguity Velocity	Sets the minimum radial ambiguity for profiling Mode 5 (WM5) and Mode 8 (WM8) Ambiguity Velocity to 5 cm/s.
&R20	Bottom Illumination	The &R command is used to set the Bottom Illumination. This value determines the size of the Bottom Track transmit pulse in relation to the Depth. &R is entered in percent. If you were bottom tracking in 100m of water and had &R=20, the Bottom Track transmit pulse would be 20% of 100m, or 20m. If &R=30, then the transmit pulse would be 30m.

---

**Anexo 3. Registro histórico de volúmenes de sedimentos de estaciones hidrométricas (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015)**

*Tabla 2. Registros históricos de volúmenes de sedimentos de las estaciones hidrométricas ubicadas en los ríos Grijalva y Usumacinta.*

Río Usumacinta						Río Grijalva					
Boca del cerro			San Pedro Tabasco			Macuspana			Las Gaviotas II		
Año	Mes	Volumen de sedimentos (Miles de m <sup>3</sup> /mes)	Año	Mes	Volumen de sedimentos (Miles de m <sup>3</sup> /mes)	Año	Mes	Volumen de sedimentos (m <sup>3</sup> /mes)	Año	Mes	Volumen de sedimentos (Miles de m <sup>3</sup> /mes)
1958	9	525.79	1961	9	18.76	1962	9	67.67	1963	11	113.15
1958	10	539.95	1961	10	28.88	1962	10	73.76	1964	9	367.61
1958	11	207.43	1961	11	47.68	1962	11	26.87	1964	10	300.29
1959	9	482.36	1962	9	19.87	1963	9	121.13	1964	11	60.66
1959	10	1154.77	1962	10	27.58	1963	10	38.17	1965	9	105.56
1959	11	624.59	1962	11	27.11	1963	11	68.9	1965	10	275.23
1960	9	1446.88	1963	9	43.28	1964	9	42.78	1965	11	43.77
1960	10	966.15	1963	10	231.9	1964	10	29.32	1966	9	184.91
1960	11	464.62	1963	11	152.1	1964	11	13.5	1966	10	203.82
1961	9	381.8	1964	9	17.96	1965	9	24.03	1966	11	119.78
1961	10	407.1	1964	10	30.94	1965	10	82.44	1967	9	161.27
1961	11	589.63	1964	11	24.48	1965	11	17.5	1967	10	642.43
1962	9	825.72	1965	9	13.19	1966	9	59.59	1967	11	83.78
1962	10	550.9	1965	10	39.94	1966	10	43.72	1968	9	243.45
1962	11	214.43	1965	11	127.51	1966	11	22.03	1968	10	473.45
1963	9	730.58	1966	9	48.86	1967	9	51.43	1968	11	198.04
1963	10	408.27	1966	10	288.4	1967	10	163.19	1969	9	312.22
1963	11	188.68	1966	11	239.31	1967	11	28.5	1969	10	93.74
1964	9	402.53	1967	9	8.08	1968	9	56.92	1969	11	186.88
1964	10	589.04	1967	10	75.75	1968	10	62.21	1970	9	263.41
1964	11	111.63	1967	11	37	1968	11	33.38	1970	10	259.25
1965	9	1188.55	1968	9	10.61	1969	9	113.34	1970	11	168.58
1965	10	2697.39	1968	10	37.75	1969	10	57.8	1971	9	368.97
1965	11	903.97	1968	11	46.63	1969	11	96.82	1971	10	263.52
1966	9	1671.88	1969	9	50.25	1970	9	131.31	1971	11	272.52
1966	10	1150.41	1969	10	33.86	1970	10	100.76	1972	9	118.4
1966	11	197.39	1969	11	11.81	1970	11	109.48	1972	10	101.23
1967	9	403.96	1970	9	10.29	1971	9	51.95	1972	11	92.21
1967	10	3477.28	1970	10	23.87	1971	10	43.28	1973	9	465.66
1967	11	1003.45	1970	11	26.26	1971	11	53.63	1973	10	707.6
1968	9	1354.76	1971	9	6.59	1972	9	49.1	1973	11	240.45
1968	10	1417.83	1971	10	7.16	1972	10	34.2	1975	9	762.98
1968	11	463.89	1971	11	4.12	1972	11	36.15	1975	10	640.94
1969	9	2684.99	1972	9	29.65	1973	9	42.14	1975	11	429.08
1969	10	1234.33	1972	10	32.65	1973	10	118.05	1976	9	278.89
1969	11	702.41	1972	11	27.98	1973	11	35.95	1976	10	348.19
1970	9	2940.5	1973	9	48.32	1975	9	86.57	1976	11	267.31
1970	10	2282.94	1973	10	48.79	1975	10	150.81	1977	9	103.06
1970	11	1107.38	1973	11	24.17	1975	11	96.86	1977	10	213.01

*Determinación de la cantidad de sólidos suspendidos en la desembocadura del cauce del río Grijalva-Usumacinta, Tabasco, México*

Río Usumacinta						Río Grijalva					
Boca del cerro			San Pedro Tabasco			Macuspana			Las Gaviotas II		
Año	Mes	Volumen de sedimentos (Miles de m <sup>3</sup> /mes)	Año	Mes	Volumen de sedimentos (Miles de m <sup>3</sup> /mes)	Año	Mes	Volumen de sedimentos (m <sup>3</sup> /mes)	Año	Mes	Volumen de sedimentos (Miles de m <sup>3</sup> /mes)
1971	9	2097.24	1974	9	2.65	1977	9	24.71	1977	11	548.2
1971	10	1363.01	1974	10	9.15	1977	10	55.26	1978	9	334.18
1971	11	1367.19	1974	11	5.5	1977	11	60.43	1978	10	565.15
1972	9	2296.49	1975	9	5.55	1978	9	98.8	1978	11	135.91
1972	10	2031.66	1975	10	26.87	1978	10	138.18	1980	10	293.76
1972	11	928.2	1975	11	33.03	1978	11	25.18	1980	11	705.4
1973	9	2713.55	1976	9	7.09	1979	9	154.82	1981	9	675.99
1973	10	4005.05	1976	10	10.08	1979	10	76.34	1981	10	333.98
1973	11	1698.23	1976	11	16.86	1979	11	33.73	1981	11	142.35
1974	9	2510.21	1978	9	15.78	1980	9	102.9	1984	9	1139.89
1974	10	3604.53	1978	10	30.47	1980	10	76.97	1984	10	398.57
1974	11	952.94	1978	11	47.77	1980	11	149.51	1984	11	67.61
1975	9	1919.04	1979	9	100.51	1982	9	157.75	1985	9	82.96
1975	10	2319.94	1979	10	182.11	1982	10	106.08	1985	10	58.2
1975	11	2337.49	1979	11	118.53	1982	11	61.72	1985	11	7.65
1976	9	1472.01	1980	9	12.5	1983	9	76.29	<b>Promedio</b>		<b>296.76</b>
1976	10	637.22	1980	10	15.31	1983	10	73.76			
1976	11	1045.16	1980	11	19.37	1983	11	41.46			
1977	9	1618.78	1981	9	28.41	1984	9	122.39			
1977	10	653.92	1981	10	30.75	1984	10	109.79			
1977	11	800.15	1981	11	29.38	1984	11	21.05			
1978	9	2862.01	1982	9	15.85	<b>Promedio</b>		<b>71.706</b>			
1978	10	2454.01	1982	10	53.06						
1978	11	1293.4	1982	11	34.07						
1979	9	3635.43	1983	9	9.39						
1979	10	3261.69	1983	10	15.63						
1979	11	1267.93	1983	11	16.91						
1980	9	2869.74	<b>Promedio</b>		<b>40.6</b>						
1980	10	2555.83									
1980	11	1419.03									
<b>Promedio</b>		<b>1311.87</b>									