

### **Obra de control Macayo**

Hasta la fecha, se han realizado modelos físicos y matemáticos del funcionamiento de la bifurcación; sin embargo, aún no hay un análisis potamológico completo que permita explicar los cambios fluviomorfológicos que se están gestando en la zona. La obra de control implementada ha demostrado que no contempló los efectos que induciría esta obra sobre el comportamiento de los cauces. Como se ha esbozado en este trabajo, la obra de control ha modificado sustancialmente la morfología en la bifurcación y las condiciones de funcionamiento hidráulicas de la misma, pues se aprecia una tendencia del sistema a abandonar el cauce del río Carrizal en las inmediaciones de la obra, lo cual aumentará el riesgo de una avulsión aguas abajo.

El porcentaje de gasto líquido hacia el río Samaria es mayor incluso para gastos bajos en el sistema. Aunque se necesitan más datos para apreciar las relaciones entre los gastos sólido y líquido, parece que el volumen de sedimento inyectado en el río Samaria sobrepasa lo que entra en el río Carrizal. Además, el efecto de disminución de los flujos sobre el río Carrizal (por efecto de la curva de remanso causado por la obra de control) está produciendo una sedimentación importante en la zona. La ubicación de la obra con compuertas en el río Carrizal, lejos de la bifurcación, causará un efecto semejante de sedimentación. Ya se puede observar este efecto producido por la obra provisional.

Algunos efectos que se observan actualmente son:

- La obra de control está limitando el gasto líquido en el río Carrizal (efecto inmediato).
- Está acelerando la agradación del río aguas arriba de las obra
- Como resultado de la agradación, se dará un aumento relativo del nivel del espejo de agua para un cierto gasto (subida de la curva de gasto líquido), es decir un aumento del riesgo de inundación, lo que puede a término significar el riesgo de nueva avulsión.
- Está aumentando la tendencia del sistema a migrar hacia su margen izquierda
- Debe diseñarse un canal de llamada que permita no solo el paso del líquido, sino también el tránsito de los sólidos sobre el río Carrizal

### **12.5.1.1 Objetivo general**

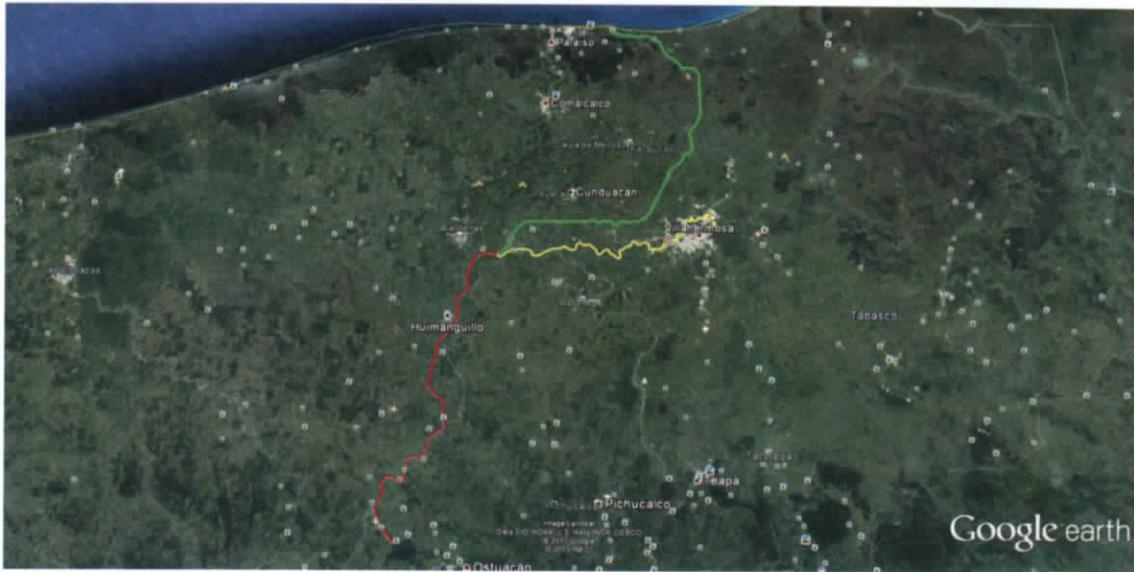
Realizar un diagnóstico fluviomorfológico y medir el transporte de sedimentos que circula por el sistema de los ríos Mezcalapa – Samaria - Carrizal, y estimar la cantidad y características de los sedimentos que se están acumulando en la obra de control Macayo.

### **12.5.1.2 Objetivos específicos**

- Realizar un diagnóstico fluviomorfológico del río Mezcalapa desde aguas abajo de la presa Peñitas, hasta su desembocadura al Golfo de México
- Estimar la cantidad y calidad de sedimentos de fondo y suspensión que circulan por el sistema Mezcalapa – Samaria - Carrizal
- Estimar la evolución y el depósito de sedimentos sobre el río Carrizal aguas arriba de la obra de control.
- Estimar la evolución y el depósito de sedimentos sobre el río Samaria aguas debajo de la bifurcación y hasta los puentes.
- Determinar la distribución de caudales líquidos y sólidos del sistema
- Determinar la influencia de la obra de control el Macayo en el transporte de sedimentos en el sistema
- Determinar la influencia de los puentes Samaria en la dinámica del transporte de sedimentos
- Determinar la hidrodinámica del sistema, la distribución de corrientes y los ejes de acarreo de sedimentos

### **12.5.1.3 Puntos de muestreo**

En el campo lejano: se realizará una campaña de campo para recopilar la información base para la caracterización fluviomorfológica del cauce a lo largo de aproximadamente 75 km sobre el río Mezcalapa; 100 km sobre el río Samaria y 65 km sobre el río Carrizal (Figura 12.5.3).



**Figura 12.5.3. Zona de estudio (Campo lejano)**

Se propone llevar a cabo un reconocimiento a detalle sobre los diferentes tramos del cauce localizados en la zona de estudio, para tal efecto se recomienda utilizar una Sistema Sonar Batimétrico Multihaz (SSBM), con resolución mínima de celdas  $\pm 10\text{cm}$  y un rango de profundidades de 1 a 50m. Este tipo de sistemas a diferencia de los sistemas convencionales monohaz tienen la capacidad de generar configuraciones tridimensionales, no solamente cortes transversales (Fig. 12.5.4); además, son capaces de generar reconocimiento de texturas de fondo (Fig. 12.5.5), datos indispensables para conocer las formas y evolución del lecho.

También para relacionar las texturas con el tipo de material, se deben tomar fotografías y muestras de fondo para realizar análisis granulométricos y se determinaran las características del material que constituye el cauce. Se consideran los siguientes aspectos:

- Reconocer las fuentes de sedimento y la evolución de su granulometría en todo el perfil longitudinal del cauce, desde el inicio aguas abajo de Peñitas a la bifurcación (75km), por el río Samaria hasta el Golfo de México (100 km) y por el río Carrizal hasta su confluencia con el río Grijalva (65 km)

- Reconocer e identificar las obras y elementos fisiográficos que evidencien un aporte o déficit de sedimentos, y determinar su efecto en el balance global del transporte sólido

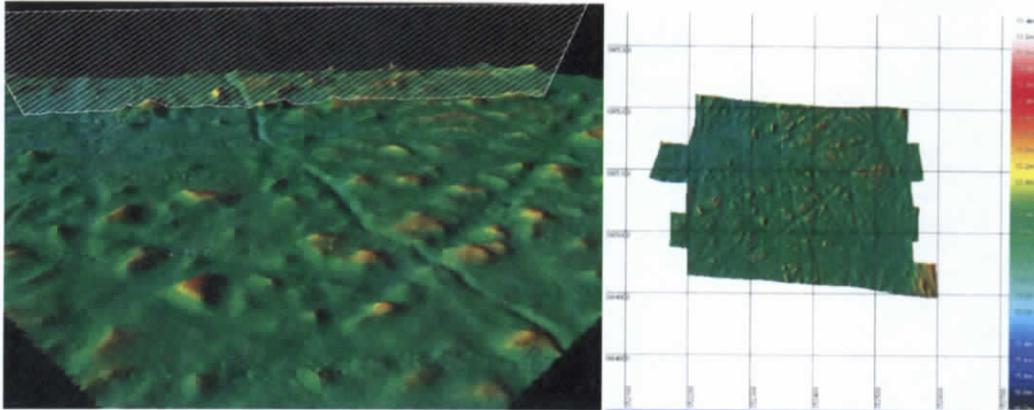


Figura 12.5.4. Barrido batimétrico con sonda multihaz (Laguna de Pajaritos, Ver, México)

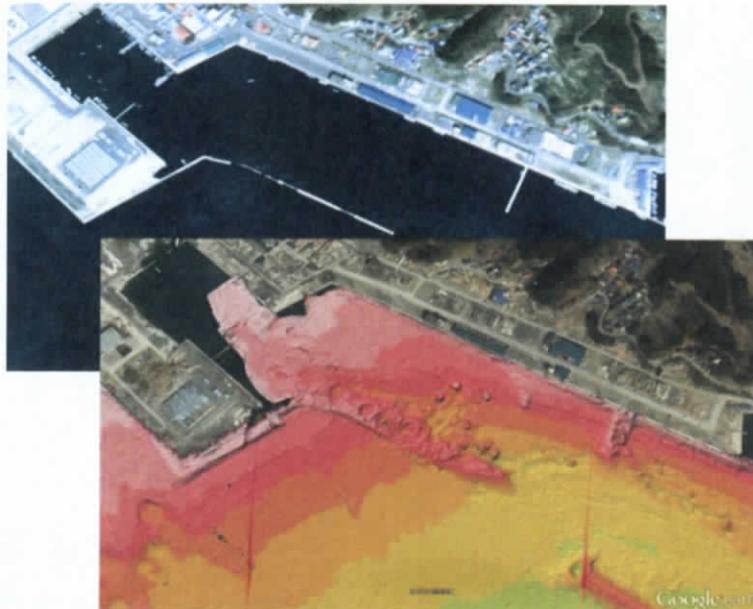
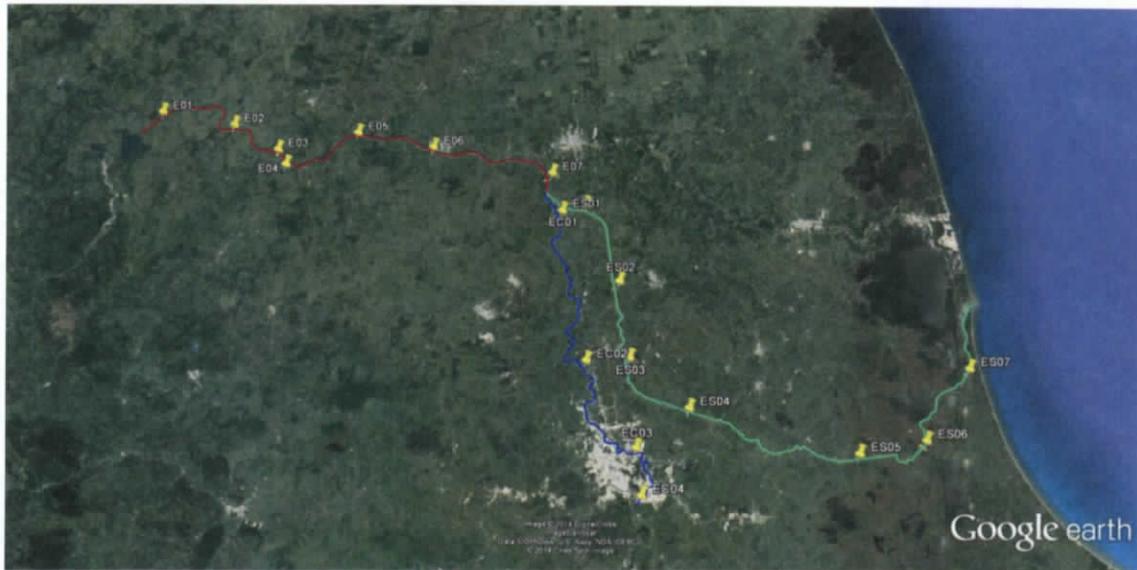


Figura 12.5.5. Empleo de Geotexture (Cortesía Konsberg Inc.)

Los datos mínimos que se deben considerar son el perfil longitudinal del thalweg, y el ancho y profundidad media del río. Estos elementos se pueden lograr a partir de una batimetría monohaz, aunque sin reconocimiento de formas y material que constituyen el fondo.

Estos estudios se deben complementar con fotogrametría aérea realizada principalmente en la época de estiaje, con la intención de identificar los bancos de arena, las zonas de depósito y erosión y los corrimientos marginales.

En lo que respecta al transporte de sedimentos, se proponen hacer un estudio de gran alcance (Campo Lejano) que cubra desde la descarga de la presa Peñitas, hasta la desembocadura al Golfo. Se proponen 7 estaciones de monitoreo sobre el río Mezcalapa, desde Peñitas hasta la bifurcación; 7 estaciones sobre el río Samaria desde los Puentes Samaria hasta su desembocadura al mar; 4 estaciones sobre el río Carrizal, desde aguas abajo del Macayo hasta la confluencia con el Grijalva (Figura 12.5.6).



**Figura 12.5.6. Estaciones de monitoreo de sedimentos. Campo Lejano**

En el campo cercano: se necesitan considerar a los sedimentos que son acarreados por el cauce, su tipo, granulometría y distribución. Es muy común que obras hidráulicas fallen o no funcionen como son diseñadas por no tomar en cuenta la influencia de los sedimentos, y el hecho de que por los ríos no solo circula agua sino que se mueven y distribuyen también partículas sólidas.

Es importante comentar que el transporte de sedimentos no se rige de la misma forma que el transporte líquido, pues en el primero no se conserva la continuidad del material

transportado, lo que se traduce en procesos de erosión y depósito a lo largo de la zona de influencia.

Aunque lo ideal sería comparar la capacidad actual de transporte de sedimentos del sistema, contra lo medido en los años 2002 – 2005, y medir sobre las mismas estaciones de medición, esto ya no es posible debido a los grandes cambios morfológicos sufridos en el sistema y a la numerosa cantidad de obras que se han ejecutado. Por lo que se establecerán nuevas zonas de medición de acuerdo a lo establecido en el punto 12.2 de este estudio (Figura 12.5.7). Una estación sobre el río Mezcalapa (E07); dos sobre el río Samaria (ESA01 y ESA02) y tres sobre el río Carrizal (EC01, EC02 Y EC03).



**Figura 12.5.7. Zonas de monitoreo campo cercano**

#### **12.5.1.4 Metodología**

##### **Etapas 1. Época de estiaje**

Se llevará a cabo la identificación y caracterización longitudinal del fondo. Se obtendrán muestras de sedimentos que serán analizadas para obtener curvas granulométricas representativas del material en todo el perfil longitudinal del cauce. Se obtendrán los principales parámetros de dispersión, de los cuales uno de los más importantes es el  $D_{50}$ , el cual permitirá hacer interpretaciones y análisis importantes, por ejemplo comparación

entre materiales en distintas secciones, la posible distribución del material y la identificación de zonas estables e inestables.

Se realizaran aforos líquidos y sólidos de sedimentos en suspensión y de fondo, para establecer las capacidad de transporte presentes durante este periodo (Estiaje). Se consideran al menos 14 mediciones por estación de monitoreo.

En el cuadro siguiente se describen los trabajos que componen esta etapa y las zonas de medición.

**Tabla 12.5.1. Etapa 1. Estiaje**

Zona de interés	Tipo de medición
Perfil longitudinal del cauce (Campo lejano)	Recolección y caracterización del material del fondo (Cada 1 km) Medición de la pendiente topográfica y seccionamiento del cauce (Cada 1 km) Identificación de zonas de aporte o déficit de sedimentos Inventario de infraestructura hidráulica a lo largo del río
Estaciones de medición (23 de campo lejano y cercano)	Seccionamiento transversal a detalle Aforo líquido Aforo de sedimentos en suspensión Aforo de sedimentos de fondo Recolección de muestras de fondo para análisis granulométrico

**Etapa 2. Época de avenidas**

Es en este periodo que se espera el mayor transporte de sedimentos, por lo que se consideran al menos 15 aforos por estación, tanto sólidos como líquidos para caracterizar la capacidad y el tipo de material transportado. En la siguiente tabla se describen los trabajos que componen esta etapa.

**Tabla 12.5.2. Etapa 2. Temporada de avenidas**

Zona de interés	Tipo de medición
Estaciones de medición (23 de campo lejano y cercano)	Seccionamiento transversal a detalle Aforo líquido Aforo de sedimentos en suspensión Aforo de sedimentos de fondo Recolección de muestras de fondo para análisis granulométrico

Las mediciones del transporte de sólidos durante la época de avenidas considera el empleo de equipos y técnicas que se ajustan a los estándares internacionales, sin embargo, en el caso que las condiciones presentes en la corriente no sean seguras para su medición directa, se emplearan mediciones indirectas. Estas mediciones consistirán en el monitoreo temporal del lecho para identificar la migración de las formas de fondo. A partir de esta variación en dos puntos cercanos, es posible encontrar el volumen de sedimento de fondo en movimiento. En estos casos se empleará un perfilador acústico (ecosonda) para estimar los sedimentos en suspensión (Szupiany *et al*, 2009)

Se recomienda realizar los muestreos de sedimentos en suspensión integrados en la vertical y emplear el muestreador adecuado a las condiciones de medición. Pudiendo ser por las condiciones del río el muestreador DH-48, DHS-59 o DH-74.

En lo que respecta a la morfología del fondo (formas del fondo), el transporte que la conforma es el transporte de fondo, caracterizado por material grueso que se transporta rodando, saltando o arrastrándose en el fondo y puede alcanzar valores del orden del 10% o más del transporte total. La importancia de conocer este tipo de transporte es que es el que tiende a configurar zonas de depósito importantes. En su medición se suelen emplear los muestreadores tipo Botella Delft, BTMA, Helley-Smith o BL-84. La recomendación es emplear el muestreador de fondo Helley-Smith con sus distintas variantes en peso y forma de empleo, pues la eficiencia reportada para este tipo de instrumentos es cercana al 100% (Emet, 1980). También, se recolectaran muestras del lecho con un muestreador DMH-60 o con una draga.

En las secciones de control establecidas, se medirán el transporte de sedimentos en suspensión y el de fondo; además, de manera simultánea se llevará a cabo el aforo líquido en las condiciones de flujo que se presenten durante el periodo de medición establecido. Se identificarán las características del material transportado y de acuerdo a esta primera medición se empleará el muestreador adecuado. Las muestras de material serán etiquetadas y llevadas al laboratorio para obtener sus características físicas (granulometría, densidad y mineralogía). A partir de estas mediciones y su procesamiento, se obtendrá el gasto morfológico medio que circule por cada sección para cada condición.



Se entregará un reporte de transporte de sedimentos que contenga la descripción de los procedimientos empleados, la localización de las estaciones de medición, las hojas con los datos de campo recolectados y las hojas de datos procesados con los gastos sólidos en suspensión por sección. Se realizarán aforos líquidos en las secciones de control propuestas, para las condiciones de flujo presentes durante la campaña de medición. La recomendación es emplear en la medición un medidor acústico Doppler (ADP), o un Molinete Hidrométrico.

A partir de los aforos líquidos se identificarán las zonas transversales al cauce donde se espera un mayor transporte de sedimento y en función de éste, se elegirá el número y la posición de los puntos de aforo sólido en cada sección.

Batimetría a detalle de la sección: Se llevará a cabo el levantamiento topográfico a detalle en la zona de influencia. Para tal efecto se recomienda la utilización de un Sistema Sonar Batimétrico.

#### **12.5.1.5 Número y frecuencia de medición**

El número y la frecuencia de medición, se propone de acuerdo a la tabla 12.5.3

**Tabla 12.5.3. Programa referencial de muestreo, Río Mezcalapa**

<b>Mes</b>	<b>Tipo de muestreo</b>	<b>Frecuencia de muestreo</b>
Enero	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Febrero	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Marzo	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Abril	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Mayo	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Junio	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Julio	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Agosto	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Septiembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Octubre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Noviembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Diciembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana

### **12.5.1.6 Análisis de laboratorio**

Para llevar a cabo el análisis de laboratorio, por las características y cantidad de muestras esperadas, las muestras recolectadas se llevarán al laboratorio para caracterizar el tipo de material recolectado, que consideré los siguientes aspectos:

1. Estimación de concentraciones para el caso de sedimentos en suspensión
2. Caracterización granulométrica para material grueso
3. Estimación de densidades
4. Caracterización mineralógica (en caso necesario)

Se entregará un reporte que contenga, procedimiento, datos de campo, procesamiento de datos y resultados.

A partir de los datos generados en las etapas de caracterización fluviomorfológica y las tendencias de transporte de sedimentos medidas, se llevará a cabo un análisis que pronostique la evolución del sistema y ayude a estimar la capacidad de transporte actual del mismo y las posibles tendencias futuras.

### **12.5.1.7 Características de los informes**

Se entregaran tres informes, uno con los resultados del Estudio Fluviomorfológico, el segundo del Estudio del Transporte de Sedimentos en temporada de estiaje, y el final que contenga el Estudio de Transporte de Sedimentos en temporada de avenidas.

El informe de fluviomorfología contendrá:

**Tabla 12.5.4. Reporte de fluviomorfología**

<b>Concepto</b>	<b>Producto</b>
Resume y análisis de la información	SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Diagnóstico fluviomorfológico	Informe y resumen de resultados

El primer informe de transporte de sedimentos época de estiaje o avenidas contendrá:

**Tabla 12.5.5. Primer informe de transporte de sedimentos**

Concepto	Producto
Resumen y análisis de la información	SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Capacidad del transporte de sedimentos (Estiaje o Avenidas)	Informe

El segundo informe (final) de transporte de sedimentos estiaje o avenidas contendrá:

**Tabla 12.5.6. Informe final**

Concepto	Producto
Resumen y análisis de la información	Actualización del SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Capacidad del transporte de sedimentos (Estiaje o Avenidas)	Informe
Estudio Integral de dinámica fluvial del sistema	Informe

## 12.5.2 Sistema Río Usumacinta

El río Usumacinta es un río que se forma en las partes altas de la sierra de los Cuchumatanes, específicamente en el Departamento de Totonicapán, en Guatemala, y desemboca en el golfo de México. Su longitud es de 1123 km y es el río más caudaloso de México y Centroamérica, también es el río más largo de Centroamérica, con una descarga media de aproximadamente 5250 m<sup>3</sup>/s. Su recorrido inicia en Totonicapán en donde corre de sur a norte, marcando el límite departamental del Quiché con Totonicapán y Huehuetenango, para luego girar al este y adentrarse en el Quiché. Luego llega al embalse de la hidroeléctrica Chixoy donde divide las Verapaces con el Quiché y luego vuelve a dirigirse al norte en donde una vez más cambia su curso al este y luego de nuevo al norte en donde sirve de frontera entre este país y México a lo largo de aproximadamente 310 km, y después se adentra en territorio mexicano por el estado de Chiapas y luego en el de Tabasco (Cotler, 2010).

Al río Usumacinta se le ha dividido en Alto y Bajo Usumacinta, el alto va desde su nacimiento en Guatemala hasta "Boca del Cerro", cerca de la ciudad de Tenosique de Pino Suárez en Tabasco.

El bajo Usumacinta comienza en ese mismo lugar, pasa por las ciudades tabasqueñas de Balancán de Domínguez, Emiliano Zapata y Jonuta, y termina en la barra de Frontera, en el municipio de Centla; después de confluir con el río Grijalva para desembocar juntos en el Golfo de México. Así, esta propuesta se limita a la zona del bajo Usumacinta.

El bajo Usumacinta es una de las pocas corrientes que aún escurre libremente, sin ningún tipo de control, y que históricamente se ha intentado de aprovechar para generación hidroeléctrica sin éxito. A pesar de la gran importancia fluvial y ambiental que tiene, a la fecha pocos estudios se han dedicado a conocer su funcionamiento fluviomorfológico, tanto para su aprovechamiento, control y/o conservación (Carabias, 2009).

El río tiene una dinámica fluvial y una interacción con el medio que lo ayuda a establecer un equilibrio natural entre él y las condiciones hidráulicas y sedimentológicas que lo rigen. Así cuando una de estas componentes se altera, el río sufre un desequilibrio y tiende a modificar sus condiciones de escurrimiento, lo que trae como consecuencias cambios en su geometría que ocasiona en la mayoría de los casos inundaciones. Entender estos fenómenos naturales es crucial para el diseño de obras hidráulicas, particularmente las de gran envergadura como son el caso de las presas. En estos casos una barrera es impuesta al escurrimiento natural del cauce, con lo cual el transporte natural de sedimentos se interrumpe. Esto trae como consecuencia que el río modifique sus condiciones de transporte sólido hacia aguas abajo, cambie las características del material transportado y las zonas de erosión y depósito se vean alteradas. Lo que a su vez va íntimamente ligado con el estado de equilibrio ambiental y ecológico del mismo, pues es en los sedimentos donde se transportan los nutrientes y se concentran los contaminantes. Por ello, sus efectos son difíciles de restaurar, y requieren ante todo cambios en los sistemas de gestión del agua y en la ordenación del territorio de amplios sectores.

La primera etapa para pronosticar los cambios que puede sufrir una corriente, se debe sustentar en un conocimiento lo mejor posible de las condiciones hidráulicas y sedimentológicas que están presentes de manera natural en el mismo. Entender cómo funciona en los diferentes ciclos hidrológicos (estiaje y avenidas) y cuáles son las cargas sedimentológicas representativas, reconocer el origen o fuente de los sedimentos y la evolución de su tamaño a lo largo de la corriente.

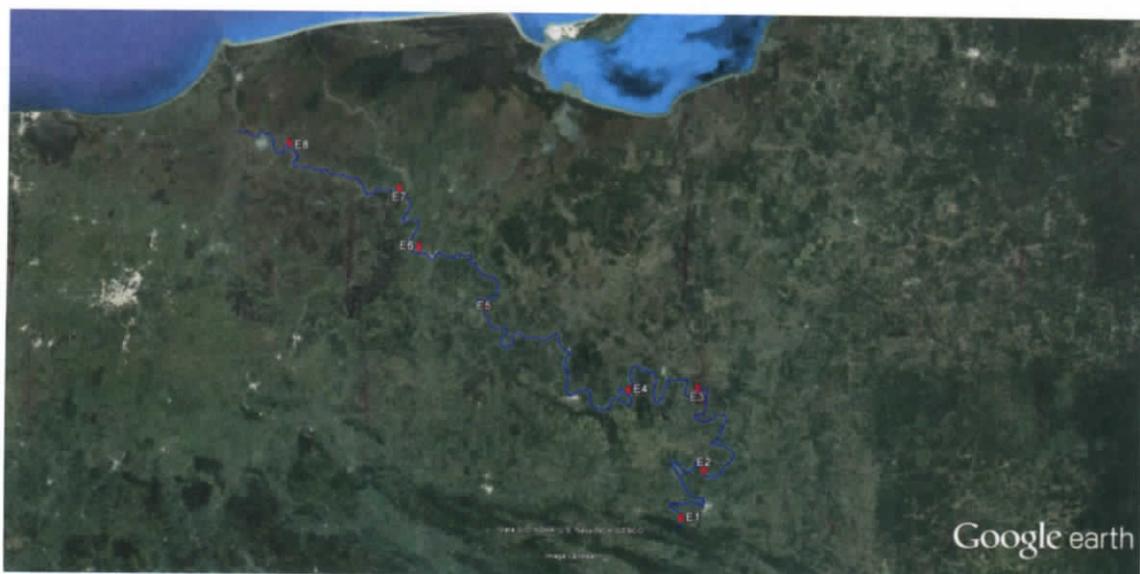
A partir de estos datos se pueden llevar a cabo los balances de sedimentos, e identificar cuáles son las zonas más susceptibles a sufrir cambios. Este conocimiento ayudará a evaluar el funcionamiento actual del río, y permitirá realizar pronósticos sobre alteraciones que puede sufrir debido a la construcción de obras hidráulicas sobre su cauce, y en su caso mitigar o disminuir los efectos adversos. A continuación se describe los trabajos que deben realizarse para el estudio del transporte de sedimentos y la dinámica fluvial del río Usumacinta, en el tramo ubicado entre Boca del Cerro y la entrada a los pantanos de Centla, en una longitud aproximada de 364 km.

#### **12.5.2.1 Objetivo general**

Analizar la capacidad de transporte de sedimentos y la dinámica fluvial que presenta actualmente el río Usumacinta, asociado a diversas condiciones hidráulicas del cauce (época de estiaje y avenidas).

#### **12.5.2.2 Puntos de muestreo**

La zona de estudio comprende la parte media de la cuenca del río Usumacinta, en un tramo aproximado de 365 km. Se recomienda como punto de partida un estudio de campo lejano con ocho estaciones de monitoreo y control de sedimentos. La separación aproximada entre estaciones será de 50km tal y como se muestra en la Figura 12.5.8



## **Figura 12.5.8 Zona de estudio y estaciones de monitoreo de sedimentos**

### **12.5.2.3 Metodología**

En el aspecto particular se plantea analizar con rigor y detalle, los resultados que aporte el análisis global de transporte de sedimentos, en dos aspectos que se consideran críticos y que se pueden dividir en: a) El Transporte sólido y b) La dinámica fluvial. A continuación se describen las actividades y detalles en cada uno de los temas.

#### **Transporte sólido**

Objetivo general: Obtener un balance global del sedimento transportado sobre el cauce del río Usumacinta, en función del régimen hidrológico (Estiaje y Avenidas) presente en condiciones actuales (naturales).

#### **Objetivos particulares:**

- Reconocer las fuentes de sedimento y la evolución de su granulometría en todo el perfil longitudinal del cauce, hasta la entrada a la zona de Pantanos de Centla.
- Identificar el tipo de transporte sólido (suspensión o de fondo) dominante a lo largo del perfil longitudinal
- Reconocer e identificar las obras y elementos fisiográficos que evidencien un aporte o déficit de sedimentos, y determinar su efecto en el balance global del transporte sólido
- Cuantificar el balance y distribución de los sedimentos en el sistema fluvial y relacionarlo con la distribución del caudal
- Realizar una comparación del transporte de sedimentos sólidos en las condiciones actuales, con posibles escenarios futuros creados como consecuencia de la modificación del escurrimiento natural.

#### **Dinámica fluvial**

Objetivo general: Estudiar la morfología fluvial en el sistema del río Usumacinta (Estiaje)

#### **Objetivos particulares:**

- Reconocer y describir los procesos morfodinámicos presentes en las diferentes secciones fluviales (Montaña, transición y planicie) en el río Usumacinta.

- Identificar eventos naturales y/o antrópicos, que muestren evidencia de haber tenido influencia en la morfodinámica del sistema
- Realizar un diagnóstico sobre el estado actual y las posibles tendencias futuras en el sistema.
- Reconocer los puntos críticos en el sistema que requerirán mayores estudios o monitoreo
- Establecer pautas para mantener un monitoreo continuo de las condiciones hidráulicas, sedimentológicas y de evolución del cauce.

La principal directriz de los estudios será la evaluación del origen, destino y transporte de los sedimentos a lo largo del cauce del sistema fluvial del río Usumacinta. Con esta evaluación se tendrán los elementos básicos para realizar un balance integral de sedimentos en el sistema y así establecer una línea base que sirva con propósitos comparativos y predictivos de tendencias futuras.

En una primera etapa se realizará un muestreo de material del lecho y su caracterización a todo lo largo del perfil longitudinal (365 Km aproximadamente), con un espaciamiento aproximado de cinco kilómetros dependiendo de las condiciones y características (tipo de material y pendiente longitudinal del fondo). Esta etapa se realiza durante el estiaje. Las características de las mediciones y los datos que se recopilaran estarán en función de las características de escurrimiento presentes.

### **Etapa 1. Época de estiaje**

Se llevará a cabo la identificación y caracterización longitudinal del fondo. Se obtendrán muestras de sedimentos que serán analizadas para obtener curvas granulométricas representativas del material en todo el perfil longitudinal del cauce. Se obtendrán los principales parámetros de dispersión, de los cuales uno de los más importantes es el  $D_{50}$ , el cual permitirá hacer interpretaciones y análisis importantes, por ejemplo comparación entre materiales en distintas secciones, la posible distribución del material y la identificación de zonas estables o inestables.

Se realizarán aforos líquidos y sólidos de sedimentos en suspensión y de fondo, para establecer la capacidad de transporte presentes durante este periodo (Estiaje). Se consideran al menos 14 mediciones por estación de monitoreo.

En la tabla siguiente se describen los trabajos que componen esta etapa y las zonas de medición.

**Tabla 12.5.7. Etapa 1. Estiaje**

Zona de interés	Tipo de medición
Perfil longitudinal del cauce	Recolección y caracterización del material del fondo (Cada 5 km) Medición de la pendiente topográfica y seccionamiento del cauce (Cada 5 km) Identificación de zonas de aporte o déficit de sedimentos Inventario de infraestructura hidráulica a lo largo del río
Estaciones de medición 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8	Seccionamiento transversal a detalle Aforo líquido Aforo de sedimentos en suspensión Aforo de sedimentos de fondo Recolección de muestras de fondo para análisis granulométrico

### **Etapa 2. Época de avenidas**

Es en este periodo que se espera el mayor transporte de sedimentos, por lo que se consideran al menos 15 aforos por estación, tanto sólidos como líquidos para caracterizar la capacidad y el tipo de material transportado. En la siguiente tabla se describen los trabajos que componen esta etapa.

**Tabla 12.5.8. Etapa 2. Temporada de avenidas**

Zona de interés	Tipo de medición
Estaciones de medición 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8	Seccionamiento transversal a detalle Aforo líquido Aforo de sedimentos en suspensión Aforo de sedimentos de fondo Recolección de muestras de fondo para análisis granulométrico

Las mediciones del transporte de sólidos durante la época de avenidas considera el empleo de equipos y técnicas que se ajustan a los estándares internacionales, sin embargo, en el caso que las condiciones presentes en la corriente no sean seguras para su medición directa, se emplearán mediciones indirectas. Estas mediciones consistirán en el monitoreo temporal del lecho para identificar la migración de las formas de fondo. A partir de esta variación en dos puntos cercanos, es posible encontrar el volumen de

sedimento de fondo en movimiento. En estos casos se empleará un perfilador acústico (ecosonda) para estimar los sedimentos en suspensión (Szupiany *et al*, 2009)

#### **12.5.2.4 Número y frecuencia de medición**

La frecuencia de medición, se propone de acuerdo a la tabla 12.17.

**Tabla 12.5.9. Programa referencial de muestreo, Río Usumacinta**

<b>Mes</b>	<b>Tipo de muestreo</b>	<b>Frecuencia de muestreo</b>
Enero	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Febrero	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Marzo	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Abril	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Mayo	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Junio	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Julio	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Agosto	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Septiembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Octubre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Noviembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Diciembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana

#### **12.5.2.5 Información complementaria**

Con la finalidad de conocer el origen, destino y tránsito de los sedimentos en el sistema fluvial, se necesitan los estudios hidrológicos y la hidráulica de los distintos cauces interconectados, tanto afluentes como efluentes. De estos se extraerán los valores relevantes para el estudio y análisis del transporte de sedimentos, así como datos referentes a la batimetría, perfil longitudinal del cauce, secciones de control y banco de niveles. Particularmente se está interesado en contar con los caudales asociados a distintos periodos de retorno, sus tirantes y pendientes respectivos a lo largo del cauce.

Las actividades para llevar a cabo el balance de sedimentos se realizaran en tres etapas:

1. Análisis de la capacidad de transporte
2. Análisis de las discontinuidades del sistema
3. Interpretación global

Se relacionaran los resultados del balance de sedimentos con la topografía, batimetría y fotogrametría aérea, con lo que será posible emitir diagnósticos sobre el equilibrio fluvial del sistema y permitirá identificar zonas que presenten una importancia particular.

### 12.5.2.6 Características de los informes

Se entregaran tres informes, uno con los resultados del Estudio Fluviomorfológico, el segundo del Estudio del Transporte de Sedimentos en temporada de estiaje, y el final que contenga el Estudio de Transporte de Sedimentos en temporada de avenidas.

El informe de fluviomorfología contendrá:

**Tabla 12.5.10. Reporte de fluviomorfología**

Concepto	Producto
Resumen y análisis de la información	SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Diagnóstico fluviomorfológico	Informe y resumen de resultados

El primer informe de transporte de sedimentos época de estiaje o avenidas contendrá:

**Tabla 12.5.11. Primer informe de transporte de sedimentos**

Concepto	Producto
Resumen y análisis de la información	SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Capacidad del transporte de sedimentos (Estiaje o Avenidas)	Informe

El segundo informe (final) de transporte de sedimentos estiaje o avenidas contendrá:

**Tabla 12.5.12. Informe final**

Concepto	Producto
Resumen y análisis de la información	Actualización del SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Capacidad del transporte de sedimentos (Estiaje o Avenidas)	Informe
Estudio Integral de dinámica fluvial del sistema	Informe

47

### 12.5.3 Sistema de ríos de la Sierra

#### 12.5.3.1 Objetivo general

Analizar la capacidad de transporte de sedimentos y la dinámica fluvial que presentan actualmente el sistema de ríos de la Sierra que comprende a los ríos: Teapa, Puyacatengo, de la Sierra y Pichucalco, asociado a diversas condiciones hidráulicas del cauce (época de estiaje y avenidas).

#### 12.5.3.2 Puntos de muestreo

La zona de estudio comprende la parte media de la cuenca de los ríos de la Sierra, que comprende a los ríos: Teapa, Puyacatengo y de la Sierra en un tramo aproximado de 75 km (Figura 12.5.9). Se recomienda como punto de partida un estudio de campo lejano con cinco estaciones de monitoreo en cada cauce hasta su confluencia y tres de ahí hasta la ciudad de Villahermosa. La separación aproximada entre estaciones será de 10 km.

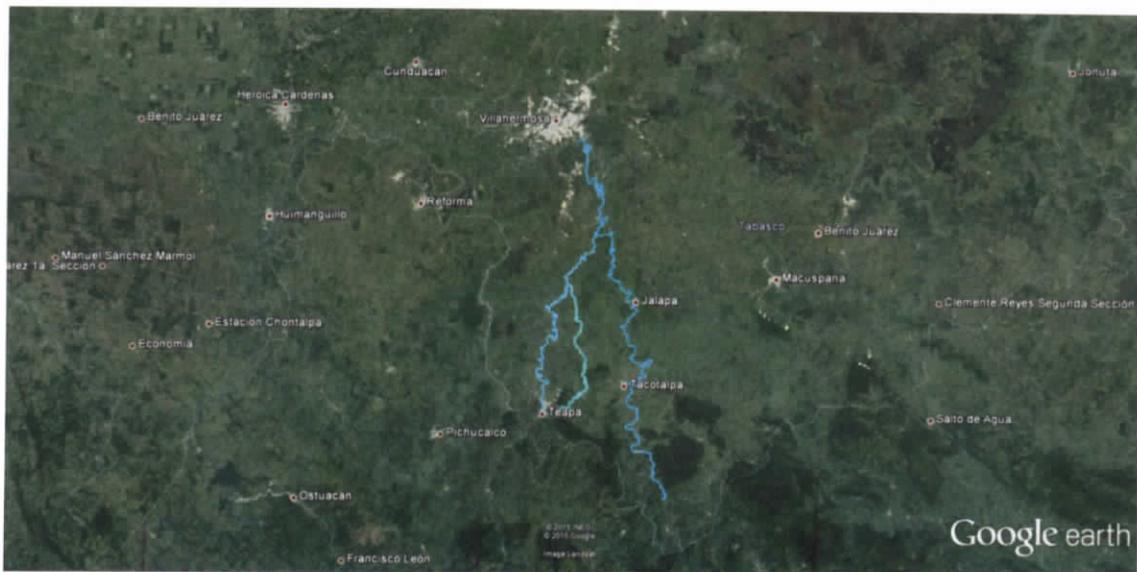


Figura 12.5.9. Sistemas de ríos de la Sierra

UF

**Tabla 12.13. Etapa 1. Estiaje**

Zona de interés	Tipo de medición
Perfil longitudinal del cauce	Recolección y caracterización del material del fondo (Cada 5 km) Medición de la pendiente topográfica y seccionamiento del cauce (Cada 5 km) Identificación de zonas de aporte o déficit de sedimentos Inventario de infraestructura hidráulica a lo largo del río
Estaciones de medición (5 por río y 3 a partir de su confluencia)	Seccionamiento transversal a detalle Aforo líquido Aforo de sedimentos en suspensión Aforo de sedimentos de fondo Recolección de muestras de fondo para análisis granulométrico

**Tabla 12.14. Etapa 2. Temporada de avenidas**

Zona de interés	Tipo de medición
Estaciones de medición (5 por río y 3 a partir de su confluencia)	Seccionamiento transversal a detalle Aforo líquido Aforo de sedimentos en suspensión Aforo de sedimentos de fondo Recolección de muestras de fondo para análisis granulométrico

**Tabla 12.15. Programa referencial de muestreo, Sistema Ríos de la Sierra**

Mes	Tipo de muestreo	Frecuencia de muestreo
Enero	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Febrero	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Marzo	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Abril	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Mayo	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Junio	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Julio	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Agosto	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada dos semanas
Septiembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Octubre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Noviembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana
Diciembre	Aforo líquido y transporte de sólidos (suspensión y de fondo)	1 vez cada semana

### 12.5.3.3 Información complementaria

Con la finalidad de conocer el origen, destino y tránsito de los sedimentos en el sistema fluvial, se necesitan los estudios hidrológicos y la hidráulica de los distintos cauces interconectados, tanto afluentes como efluentes. De estos se extraerán los valores relevantes para el estudio y análisis del transporte de sedimentos, así como datos referentes a la batimetría, perfil longitudinal del cauce, secciones de control y banco de niveles.

Particularmente se está interesado en contar con los caudales asociados a distintos periodos de retorno, sus tirantes y pendientes respectivos a lo largo del cauce.

Las actividades para llevar a cabo el balance de sedimentos se realizaran en tres etapas:

4. Análisis de la capacidad de transporte
5. Análisis de las discontinuidades del sistema
6. Interpretación global

Se relacionaran los resultados del balance de sedimentos con la topografía, batimetría y fotogrametría aérea, con lo que será posible emitir diagnósticos sobre el equilibrio fluvial del sistema y permitirá identificar zonas que presenten una importancia particular.

#### **12.5.3.4 Características de los informes**

Se entregaran tres informes, uno con los resultados del Estudio Fluviomorfológico, el segundo del Estudio del Transporte de Sedimentos en temporada de estiaje, y el final que contenga el Estudio de Transporte de Sedimentos en temporada de avenidas.

El informe de fluviomorfología contendrá:

**Tabla 12.5.16. Reporte de fluviomorfología**

<b>Concepto</b>	<b>Producto</b>
Resumen y análisis de la información	SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Diagnóstico fluviomorfológico	Informe y resumen de resultados

El primer informe de transporte de sedimentos época de estiaje o avenidas contendrá:

**Tabla 12.5.17. Primer informe de transporte de sedimentos**

<b>Concepto</b>	<b>Producto</b>
Resumen y análisis de la información	SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Capacidad del transporte de sedimentos (Estiaje o Avenidas)	Informe

El segundo informe (final) de transporte de sedimentos estiaje o avenidas contendrá:

**Tabla 12.5.18. Informe final**

<b>Concepto</b>	<b>Producto</b>
Resumen y análisis de la información	Actualización del SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Capacidad del transporte de sedimentos (Estiaje o Avenidas)	Informe
Estudio Integral de dinámica fluvial del sistema	Informe

#### **12.5.4 Sistema de obras derivadoras (Escotaduras)**

Como parte de las obras que se construyeron para protección de la ciudad de Villahermosa, dentro del Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), se encuentran una serie de estructuras derivadoras a los largo de los ríos de la Sierra y el río Grijalva. Estas obras permiten derivar parte del gasto que escurre sobre dichos ríos hacia distintas zonas Lagunares, dejando pasar únicamente los gastos de conservación hacia Villahermosa. Actualmente se conoce el caudal líquido que dichas estructuras desalojan; sin embargo, el caudal sedimentológico que está siendo acarreado y depositado en las zonas lagunares no ha sido cuantificado.

Conocer el funcionamiento hidráulico y sedimentológico de las estructuras reales, son datos esenciales para asegurar su buen funcionamiento y particularmente evaluar la capacidad de transporte de material fino hacia las zonas lagunares. Ante esto, se planteó la necesidad de medir sobre cada una de las estructuras el caudal líquido y sólido circulante y construir sedimentogramas que aporten los elementos para el manejo y conservación de las zonas reguladoras.

##### **12.5.4.1 Objetivo General**

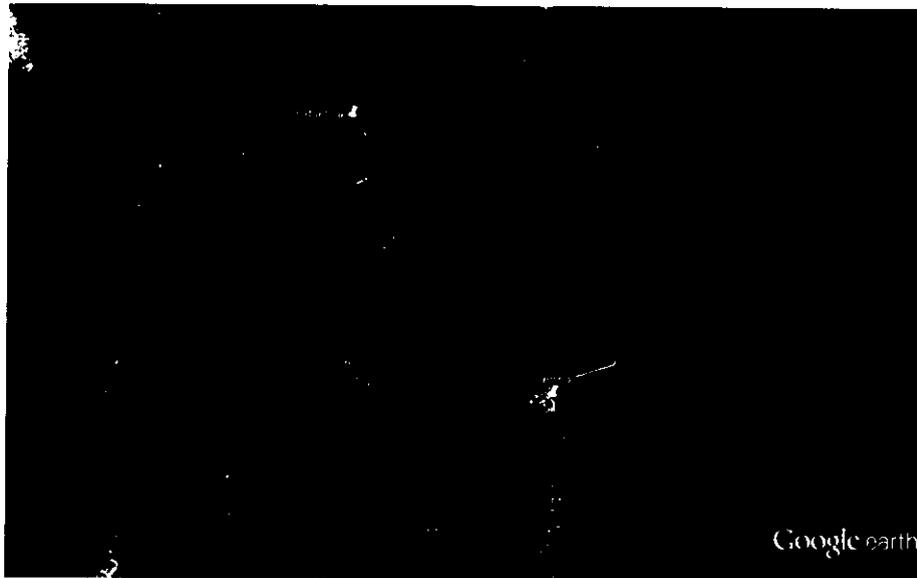
Determinar los caudales sólidos y líquidos derivados por cada escotadura y estimar la tasa de transporte de sedimentos en suspensión acarreados por el sistema hacia la zona lagunar.

#### **12.5.4.2 Objetivos específicos**

- Realizar monitoreo de aforo líquido y transporte de sedimentos (suspensión), sobre las escotaduras del río de la Sierra y sobre el río Grijalva
- Medir en época de avenidas la capacidad de transporte de sedimentos finos en cada escotadura
- Evaluar la tasa de depósito y avance en la zona lagunar.

#### **12.5.4.3 Zona de estudio**

Se consideran 2 escotaduras sobre el río de la Sierra (Figura 12.5.10); una sobre la laguna de los zapotes y dos sobre la margen derecha del río Grijalva (Figura 12.5.11) y tres sobre la margen izquierda del río Grijalva (Figura 12.5.12).

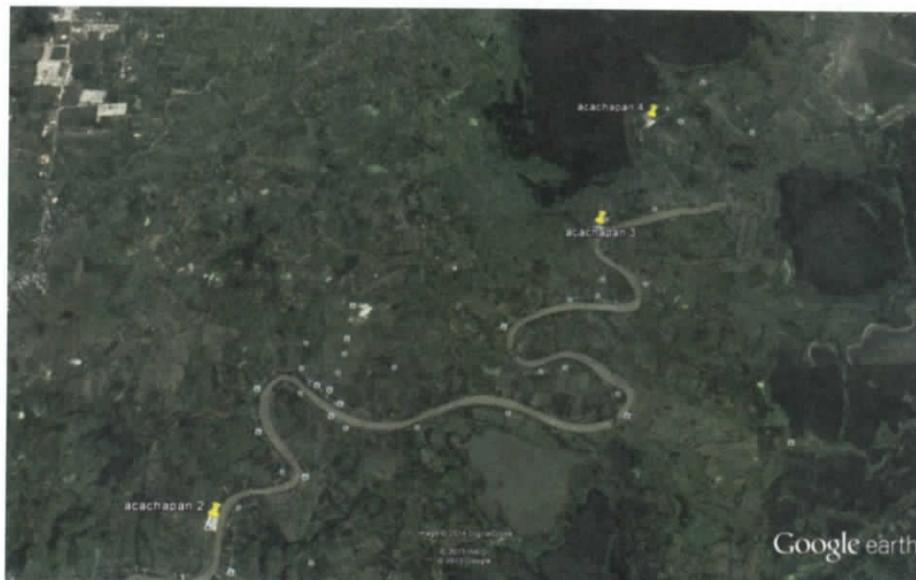


**Figura 12.5.10. Escotaduras sobre el río de la Sierra**

11/11



**Figura 12.5.11. Escotaduras sobre la zona lagunar los zapotes y margen derecha del río Grijalva**



**Figura 12.5.12. Escotaduras sobre la margen izquierda del río Grijalva**

#### **12.5.4.4 Metodología**

Se considera el aforo continuo tanto líquido como sólido en las escotaduras durante un periodo estimado de 120 días (4 meses), realizando al menos 50 mediciones por escotadura.

VF

También, se propone el anclaje de varillas georeferenciadas en las salidas de las derivaciones, en un radio aproximado de 10km, con la intención de recabar información para estimar la tasa de depósito y el grado de avance del mismo en la zona de influencia.

#### **Aforo líquido**

Se realizarán aforos líquidos en los canales derivadores, para las condiciones de flujo presentes durante la campaña de medición. Se empleará en la medición de velocidades un medidor acústico Doppler (ADP).

#### **Medición de sedimentos en suspensión**

En las secciones de control establecidas, se medirán el transporte de sedimentos en suspensión y se relacionará con el aforo líquido en las condiciones de flujo que se presenten durante el periodo de medición establecido. Las muestras de material serán etiquetadas y llevadas al laboratorio para obtener sus características físicas (densidad). A partir de estas mediciones y su procesamiento, se obtendrá el gasto en suspensión medio que circule para cada condición (Anexo A.12.3).

#### **12.5.4.5 Análisis de laboratorio**

Se estimaran las concentraciones en ppm para el caso de sedimentos en suspensión.

Se entregará un reporte que contenga, procedimiento, datos de campo, procesamiento de datos y resultados.

#### **12.5.4.6 Frecuencia de medición**

La frecuencia de medición, se propone de acuerdo a la tabla 12.5.13.

**Tabla 12.5.19. Programa referencial de muestreo, Escotaduras**

Mes	Tipo de muestreo	Frecuencia de muestreo
Septiembre	Aforo líquido y sólidos en suspensión	1 vez al día
Octubre	Aforo líquido y sólidos en suspensión	1 vez al día
Noviembre	Aforo líquido y sólidos en suspensión	1 vez al día
Diciembre	Aforo líquido y sólidos en suspensión	1 vez al día

#### **12.5.4.7 Tasa de depósito**

Se anclara varillas en la zona de salida de los canales derivadores, formando un abanico fluvial. Se medirá el nivel del suelo antes de la época de avenidas y un mes después de la misma y se estimara la tasa de depósito de material fino y el avance sobre la zona.

Se entregará un reporte que contenga la ubicación de las varillas, los datos de campo recolectados, el procesamiento de datos y resultados.

#### **12.5.4.8 Características de los informes**

Se entregaran un informe por cada una de las estructuras de control analizadas, que incluya los resultados de los aforos líquidos, sólidos en suspensión y evaluación de tasa de transferencia y depósito.

Cada informe deberá contener:

**Tabla 12.5.20. Informe estructuras de control**

<b>Concepto</b>	<b>Producto</b>
Resumen y análisis de la información	SIG con la información recolectada y georreferenciada en campo
Campaña de campo	Informe y base de datos
Trabajo de laboratorio	Informe y base de datos
Capacidad del transporte de sedimentos	Informe y base de datos
Estimación de tasa de transferencia y depósito de sedimentos hacia zona lagunar	Informe y SIG con la información procesada y los resultados

#### **12.5.5 Técnicas**

La medición de los sedimentos es un proceso complicado y costoso, por lo que no es factible realizar mediciones si no se tiene claro el aprovechamiento o uso de los datos obtenidos. Esencialmente, antes de iniciar una campaña de mediciones, se deben hacer las interrogantes siguientes: ¿Por qué o para qué medir?, ¿Qué medir?, ¿Dónde medir?, ¿Cómo medir? y ¿Cuándo medir? A continuación se comenta un panorama global de la respuesta a estas interrogantes.

##### **¿Por qué medir?**

Las mediciones de sedimentos son útiles en primer lugar por su valor como datos hidrológicos, los cuales se obtienen de una medición rutinaria de gasto sólido (carga de lavado) junto con gasto líquido. Estos generan un banco básico de datos de sedimentos en suspensión, que puede ser usado con diferentes fines; sin embargo, al tratar problemas de ingeniería fluvial donde el transporte de sedimentos es significativo, los datos de sedimentos en que se transportan por otro mecanismo por ejemplo de fondo, son una necesidad básica para el diseño de obras.

### **¿Qué medir?**

Debido a la complejidad y al conocimiento no muy claro de los mecanismos de transporte de sedimentos que se tiene, el problema de la medición de sedimentos es más complicado e implica más que sólo medir el flujo líquido; pues, se debe tener claro el tipo de sedimento que se quiere medir, el tipo de información requerida y la necesidad de uso que se le dará. Así como tener en cuenta que es un proceso costoso, que debe realizarse por personal calificado y que debe tener bien identificada la problemática, la utilidad y el tipo de dato de sedimento requerido.

### **¿Dónde medir?**

Por sencillez y debido a que las estaciones hidrométricas están bien establecidas, tradicionalmente prevalece la idea de tratar al sedimento como un parámetro más, y medirlo en las mismas estaciones de aforo de líquido; sin embargo, esta práctica no siempre toma en cuenta las fuentes de sedimento, sus procesos de transporte o las características mínimas que debe cumplir una estación de medición de sedimentos. Por lo tanto, como punto de partida se necesitan definir criterios específicos para el establecimiento y ubicación de las redes de medición de sedimentos, ya que actualmente estos son limitados.

### **¿Cómo medir?**

Actualmente, existen en el mercado muchos equipos alternativos para llevar a cabo la medición de sedimentos, con principios de operación muy simples. En este sentido, se puede comentar que no hay aparatos perfectos, y que la clave de una buena medición se debe al uso de buenas o malas técnicas. En este sentido, la elección de un tipo específico de equipo, dependerá de las características del sedimento que se quiere medir y de las condiciones del flujo en el instante de la medición.

### **¿Cuándo medir?**

Esta interrogante es una de las cuestiones que más cuidado debe tener, debido a que el comportamiento del sedimento es mucho más complejo que el del flujo líquido y los cambios en el transporte no son observables a simple vista. Generalmente, la frecuencia de medición de sedimento es alta durante las épocas de estiaje y crecidas pequeñas, comparada con la que se necesita para realizar análisis.

En cambio durante eventos extraordinarios, la frecuencia de medición generalmente resulta baja, sobre todo debido a la dificultad que existe al hacer las mediciones bajo esas condiciones.

Una vez establecidas las interrogantes anteriores, se está en condiciones de iniciar el proceso de solución de cada una de ellas por medio del planteamiento de las estrategias de medición de sedimentos más apropiadas, pero partiendo del entendimiento básico de los mecanismos de transporte y de la utilidad de los datos obtenidos.

### Mecanismos de transporte

El sedimento al ser transportado, se puede diferenciar según su comportamiento en dos tipos (García Flores *et al*, 1998): transporte de fondo que es material que forma el fondo del cauce y transporte de lavado, formado por partículas muy finas como limos y arcillas que el agua transporta en suspensión. La diferencia principal entre estos dos tipos de transporte radica en que el transporte de fondo depende de las características hidráulicas de la corriente y de las características físicas del material; lo anterior no ocurre con el transporte de lavado, pues en forma general un río puede transportar tanto material de lavado como llegue a él, casi independientemente de las características hidráulicas de la corriente.

El transporte de lavado siempre tiene lugar en suspensión, mientras que el transporte de material del fondo se desarrolla en una franja en el fondo, denominada capa activa. La capa activa, se encuentra justo arriba del lecho del cauce. Einstein, introdujo este concepto y le asignó un espesor de tamaño igual a dos veces el diámetro de la partícula de mayor tamaño arrastrada por las condiciones de flujo. En la realidad este espesor de la capa activa, es mucho mayor que el considerado por Einstein. Sin embargo, Peters (1977b), ha encontrado espesores de capa de fondo de hasta 2 metros para algunos ríos de África. En México aunque no se tienen ríos de esas magnitudes, Rivera *et al* (2003) han encontrado espesores de la capa de fondo de hasta 0.3m para algunos ríos del sureste mexicano.

La clasificación del transporte de sedimentos según la norma ISO 4363 (2002) es como se muestra en la figura 12.5.13. Algunas observaciones a la clasificación ISO, en lo que respecta a ríos de fondo arenoso son las siguientes:

- No toma en cuenta la distribución granulométrica; no considera el intercambio en la zona de transición entre el transporte de arrastre de fondo y el de suspensión; no considera la existencia de un intercambio real y continuo entre el transporte en contacto con el fondo y el transporte cerca o sobre el fondo.
- Al ser el transporte de sedimentos un proceso continuo y dinámico, resulta difícil tratar de clasificarlo sin tener en cuenta el intercambio que existe entre las diferentes zonas. Es muy importante entender y cuantificar el transporte de fondo ya que es ahí donde se dan los cambios fuertes en el cauce (geometría) y que afectan directamente al régimen hidráulico.

En la tabla 12.5.15 se muestra el impacto que sufre un río debido a cambios en la carga de sedimentos y caudales líquidos transportados.

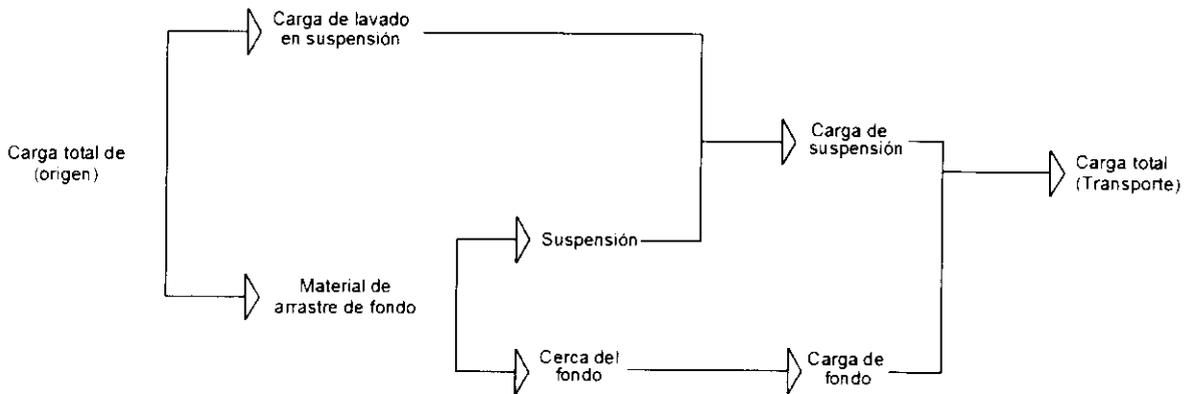


Figura 12.5.13. Mecanismos de transporte (ISO 4363)

Tabla 12.5.21 Procesos fluviomorfológicos. ( $Q_s$ ) Carga de sedimentos, ( $Q_w$ ) caudal líquido, (+) incremento, (-) decremento, (=) constante. (Fuente: Thorne, 1997).

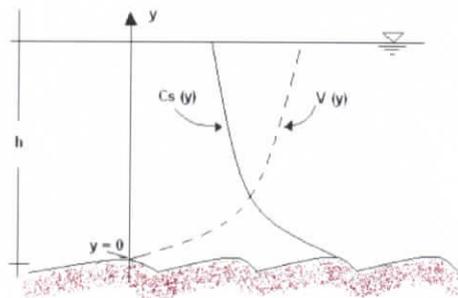
Cambio	Morfología del cauce	Cambio	Morfología del cauce
$Q_s+$ $Q_w=$	Depósito, inestabilidad del cauce, ensanchamiento y asolvamiento del cauce	$Q_s+$ $Q_w-$	Depósito
$Q_s-$ $Q_w=$	Erosión, inestabilidad del cauce,	$Q_s+$ $Q_w+$	Los procesos aumentan su

111

Cambio	Morfología del cauce	Cambio	Morfología del cauce
	estrechamiento y aumento de profundidad		intensidad
$Q_s = Q_w +$	Erosión, inestabilidad del cauce, ensanchamiento y aumento de profundidad	$Q_s - Q_w -$	Los procesos disminuyen su intensidad
$Q_s = Q_w -$	Depósito, inestabilidad del cauce, estrechamiento y asolvamiento del cauce	$Q_s - Q_w +$	Erosión, inestabilidad del cauce, incertidumbre sobre la profundidad y ancho.

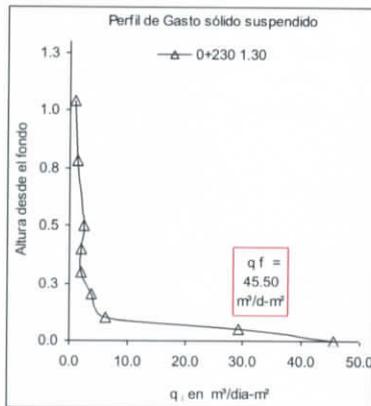
Las teorías tradicionales sobre la distribución de velocidades sobre la vertical y el transporte de sedimentos en suspensión, son como los propuso Rouse, figura 12.5.14. Aunque, en la realidad, para ríos arenosos donde junto con la carga de lavado se lleva una alta carga de material grueso, estas distribuciones no presentan ese comportamiento; sino, son como se muestran en las figuras 12.5.15 y 12.5.16, donde se aprecian dos mecanismos de transporte distinto, uno cerca del fondo (0.15m aproximadamente) y otro en suspensión, con respecto a la distribución ideal.

Esta diferencia plantea la necesidad de realizar mediciones de flujo de sedimentos sólidos para distintas fracciones granulométricas. En el caso de la carga de lavado esta presenta una distribución generalmente más homogénea durante crecidas, pero de forma más heterogénea durante la época de estiaje, mientras que la carga arenosa se distribuye de manera heterogénea, excepto en avenidas con caudales fuertes y turbulentos.

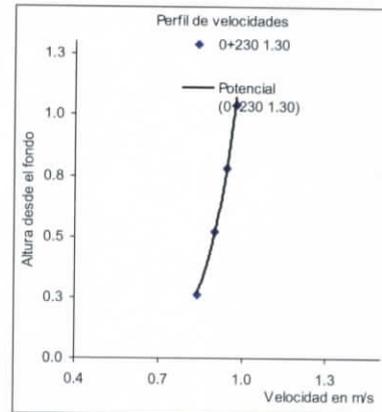


**Figura 12.5.14. Perfil ideal de distribución de velocidad de la corriente y flujo de sólidos en suspensión. (Fuente: ISO 4363)**

*VK*



**Figura 12.5.15. Perfil real de la distribución de flujo de sólidos en suspensión. (Fuente: Rivera et al, 2006)**



**Figura 12.5.16. Perfil real de la distribución de velocidad (Fuente: Rivera et al, 2006)**

Una observación importante es la relacionada con la variabilidad del transporte de fondo, pues este es bastante irregular y errático en función el tiempo, y muy irregular en función de la posición (de la sección transversal), aún mucho más en comparación con el transporte en suspensión. En la tabla 12.5.16, se muestran los tipos de transportes de sedimentos y su utilidad.

**Tabla 12.5.22. Datos de sedimento y su utilidad (Fuente: Peters, 1998)**

Tipo de dato	Utilidad
Sedimento en suspensión	Banco de datos hidrológico
Sedimento en suspensión y arrastre de fondo	Estudios de balance de sedimento
Sedimento en suspensión y arrastre de fondo	Estudios de morfología
Sedimento en suspensión y muestreo de material de fondo	Estudios de medio ambiente (Contaminación)

Ante los distintos mecanismos de transporte que se presentan en un cauce, surge la dificultad de las técnicas de medición de ellos, pues no es posible emplear un solo equipo; sino, se necesitan aplicar varios; además, cuando es la primera vez que se va a cuantificar el transporte de sedimentos en el río, se deben realizar monitoreos constantes durante la mayor parte del año, particularmente durante las avenidas, para contar con la mayor cantidad de datos significativos para lograr el mejor entendimiento de los procesos

involucrados y poder identificar todas las componentes de la carga de sedimentos transportada. Además, cada río es distinto por lo que tienen distintas características de sedimento y respuesta en los procesos de transporte del mismo. Por lo tanto, se necesitan estrategias de medición en función del tipo de río y de datos requeridos.

#### Selección de sitios de monitoreo

El establecimiento de las estrategias de medición de sedimentos, requiere del conocimiento de las características del río y de su cuenca, considerándose datos como: relieve (orografía), geología, composición del suelo (mecánica de suelos), geomorfología, hidrología, hidráulica y medio ambiente. Recopilada la información anterior se procede a seleccionar los sitios de medición apropiados, los cuales no siempre coinciden con las estaciones de aforo de caudal líquido. Las estaciones deben evitar lugares donde el régimen sedimentológico este perturbado, por ejemplo: curvas de cauces (figura 12.5.17), efectos de puentes (pilas anchas u oblicuas, figura 12.5.18), donde sea evidente una rápida variación del ancho o de la profundidad donde disminuya el ancho de la planicie de inundación( 12.5.19), donde exista una discontinuidad del río (12.5.20) o en confluencias.

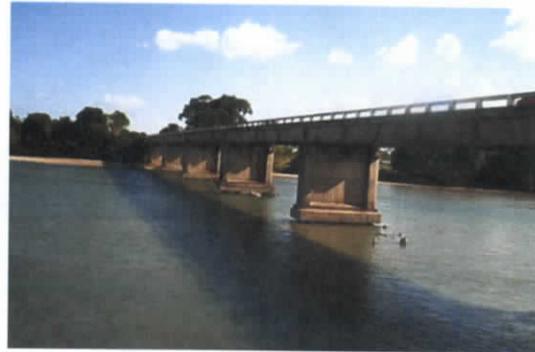
Ya preseleccionado el sitio, se debe hacer un análisis para identificar particularidades tales como: fenómenos de agradación (azolvamiento o pérdida de capacidad hidráulica) o de degradación del lecho, presencia de formas del lecho (dunas, barras, bancas, islas), variabilidad de las características de los sedimentos del lecho y presencia de rocas que emergen del lecho sedimentario.

Verificado que la estación de sedimentos cumple con los requerimientos mínimos necesarios para efectuar la medición, se procede al establecimiento de la estación de medición, la cual puede ser permanente si se llevaran a cabo mediciones rutinarias, o provisional si las mediciones serán eventuales. En este caso se deben considerar los siguientes aspectos: La infraestructura de las estaciones de aforo líquido no siempre cumplen con los requerimientos para la medición del gasto sólido; no es recomendable considerar al sedimento como un parámetro del flujo líquido que pueda derivarse de un simple análisis de laboratorio aceptable solamente para ríos con carga de lavado; la infraestructura necesaria para llevar a cabo la medición del gasto sólido es más pesada que para la medición del gasto líquido.

44



**Figura 12.5.17. Curvas**



**Figura 12.5.18. Puentes**



**Figura 12.5.19. Cambios de profundidad**



**Figura 12.5.20. Obstrucciones**

#### Consideraciones generales en la medición de sedimentos

Se debe tener en cuenta que se considera como gasto sólido a la cantidad de material sólido que atraviesa la sección de aforo por unidad de tiempo. Teniendo material que viaja en suspensión y material que viaja en el fondo.

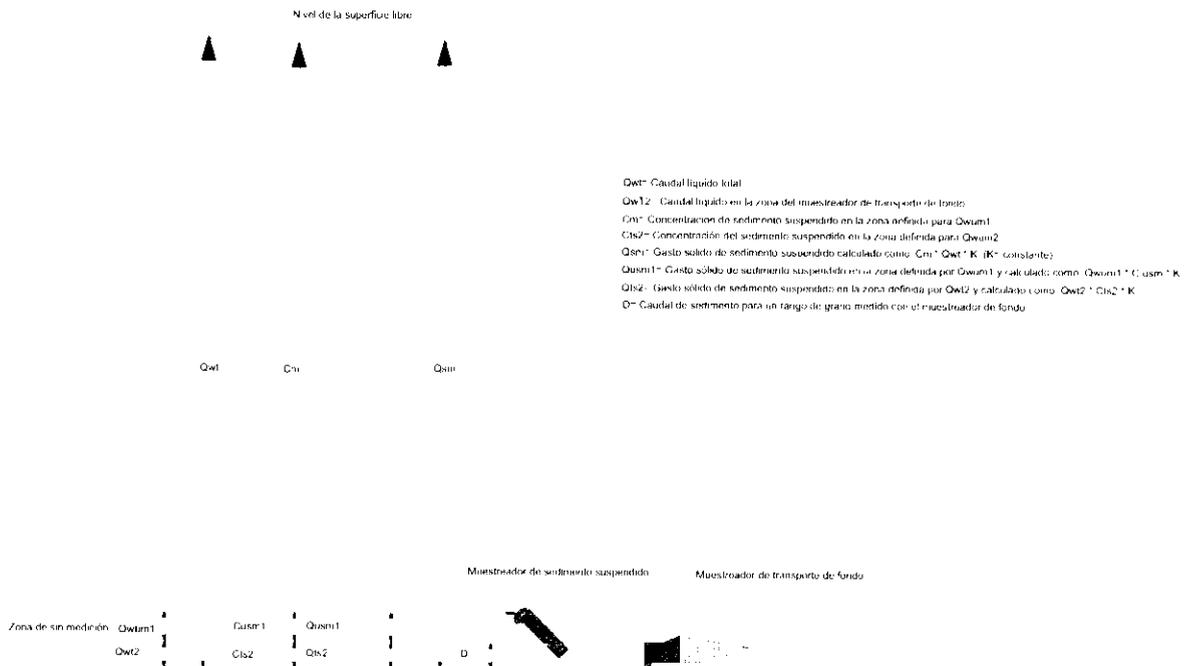
El gasto sólido en suspensión, se determina por la multiplicación de la concentración del sólido en una muestra de agua por la velocidad de la corriente. Se supone que la velocidad de la corriente representa la velocidad del agua lo que para flujo turbulento con carga principalmente de lavado es aceptable. Cuando el flujo acarrea partículas de limo grueso o arena, la velocidad de estas puede diferir de la del flujo, principalmente cerca del fondo. El gasto sólido en suspensión también puede determinarse de manera "directa" por medio de muestreadores que remueve el agua y retiene el sedimento que pasa a través de él durante cierto intervalo de tiempo.

Estos muestreadores funcionan como una trampa de sedimentos, pero no pueden retener toda la carga de sedimento en suspensión, sólo las partículas más gruesas que el limo.

En la medición del material que viaja en el fondo, la mayoría de los muestreadores de fondo funcionan con el principio básico de “gasto sólido” tipo cajón, trampa o diferencia de presión.

En México como en muchos países, existe una confusión entre la medición del transporte por arrastre de fondo y el muestreo de fondo, ya que el material sacado del lecho del cauce con muestreadores de material del lecho, no corresponde necesariamente al material transportado por el flujo.

El transporte total de sedimentos, considera a los sedimentos de suspensión, más los sedimentos de fondo; sin embargo, debido al diseño de los muestreadores para carga en suspensión y los de fondo, existe una zona cerca del fondo donde generalmente no se toman muestras (ver figura 12.5.21). Sin embargo, se pueden hacer combinaciones y diseñar estrategias para medir la fracción arenosa de la carga en suspensión en la zona donde no pueden operar los muestreadores convencionales (zona sin medición) (García Flores *et al*, 1998), (J. J. Peters, 1998b).



12.5.21

### **Figura 12.5.21. Zonas con medición y zonas sin medición de sedimentos**

Tradicionalmente la carga de sedimentos que se mide, depende del tipo de río y de la capacidad técnica del servicio hidrológico encargado de llevarla a cabo. Así, por ejemplo en ríos con carga principalmente de lavado, la medición con muestreadores sencillos (tipo botella) es apropiada. En ríos con lechos arenosos, la carga en suspensión cerca del lecho y el transporte de arrastre de fondo, no se miden de manera rutinaria, esto debido a que la medición del transporte en suspensión y de arrastre de fondo resultan complejo y a un desconocimiento de los mecanismos presentes y la importancia de estos datos en el diseño de obras.

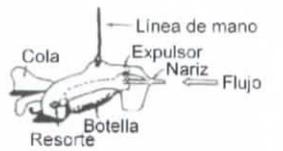
### **12.5.6 Equipos**

A continuación se describen los aparatos y equipos que se consideran más adecuados para la medición de sedimentos en los ríos de Tabasco. Se pone especial atención a restricciones tales como: infraestructura disponible en la estación de medición; la accesibilidad y los problemas de suministros y repuestos; así como al tipo de río.

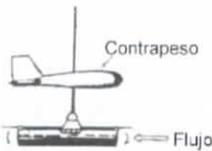
En la figura 12.5.22, se muestra de manera esquemática la diversidad de aparatos existentes para la toma de muestras de sedimentos en un río.

UK

TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN

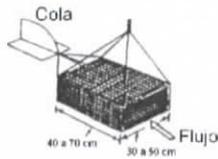


1 Muestreador integrado en la profundidad. US DH-59  
Uso: Ríos con poca corriente

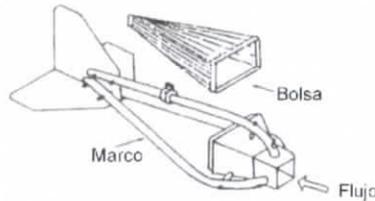


(a) Muestreador horizontal instantáneo

TRANSPORTE DE FONDO

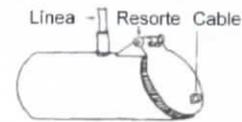


A. Muestreador de canasta  
Uso: Ríos con fondo de grava

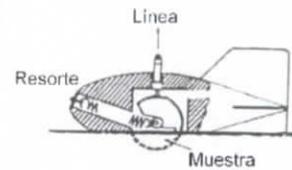


B. Muestreador de canasta  
Uso: Ríos con fondo de grava

MATERIAL DEL FONDO



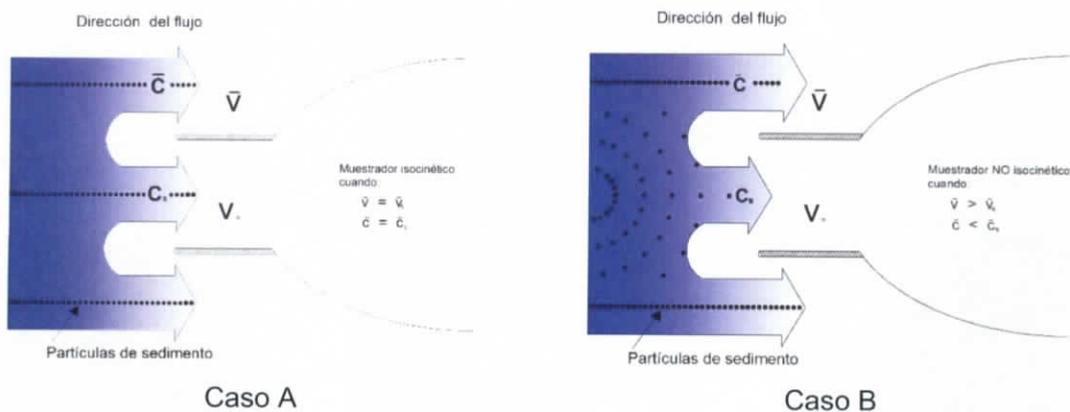
C. Muestreador tipo cuchara  
Uso: Ríos someros con fondo arenoso

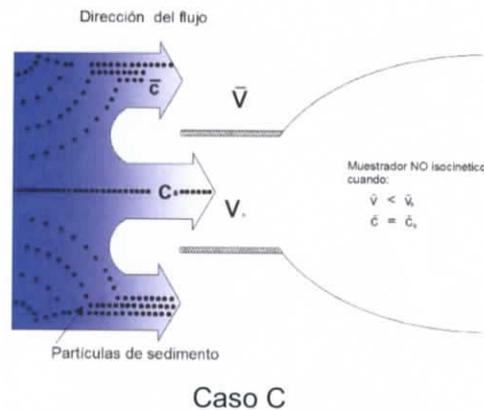


D. Muestreador excavador USBM - 54  
Uso: Obtención de muestras del lecho en aguas profundas

Figura 12.5.22. Equipos de medición de sedimentos

La mayoría de los equipos operan bajo el principio de medición isocinética, lo que significa que en el diseño del muestreador, el agua y las partículas que entran a él, tienen una velocidad igual a la de la corriente; es decir, el aparato no tiene efectos significativos sobre el flujo, tales como reducción de la velocidad o desviación de la trayectoria de las líneas de flujo y de las partículas sólidas, tal como se muestra en la figura 12.5.23.





**Figura 12.5.23. Medición isocinética. Velocidad a la entrada del muestreador idéntica a la del flujo (Fuente: Thomas, 1999)**

Donde  $V$  es la velocidad media de la corriente,  $V_n$  es la velocidad en la entrada del muestreador,  $C$  es la concentración media de sedimentos en la muestra y  $C_s$  es la concentración de sedimentos en la entrada del muestreador. Como se aprecia en la figura, para lograr una medición isocinética se debe tener una velocidad en la entrada de muestreador idéntica a la velocidad media del flujo (caso A), con esto se asegura que la concentración de sedimentos en el muestreador sea la misma concentración de sedimentos en el flujo. Si la velocidad media en el flujo es mayor que la velocidad en la entrada del muestreador (caso B), la concentración de sedimentos obtenida será mayor que la existente en la corriente. Una velocidad media del flujo menor que la velocidad a la entrada del muestreador (caso C), se reflejará en una toma menor concentración de sedimentos en el muestreador con respecto a la existente en la corriente (Thomas *et al*, 1999).

Generalmente, un flujo en un río, no se aproxima a un flujo ideal con velocidad, dirección y magnitud constantes; la turbulencia produce variaciones de corriente que no permiten la toma isocinética ideal; sin embargo, es mejor tener un muestreador que se aproxime lo más que se pueda a la toma isocinética.

Esto debido a que en general, la turbulencia es mayor cerca del fondo, por lo que la medición será menos isocinética ahí que cerca de la superficie.

VF

### Muestreadores tipo botella aerodinámica

Este tipo de muestreadores son empleados en la medición de transporte en suspensión que tiene un porcentaje significativo de carga de material del fondo, como es el caso de muchos de los ríos de Tabasco.

### Muestreadores ligeros (2.5 kg), tipo US DH-48 (figura 12.5.24)

Estos muestreadores son ligeros para su aplicación a mano (figura 12.5.25). Consisten en una botella aerodinámica en forma de “pez”, que permite la medición en aguas someras con poca corriente para toma de muestras integradas en la vertical.

El producto de la profundidad (m), por la velocidad de la corriente (m/s) debe ser menor a uno. El operador trabaja dentro del cauce del río o desde un pequeño puente, aunque ocurre frecuentemente que se utilice este tipo de muestreadores suspendido desde un cable, lo que no es recomendable pues induce errores en la medición.



**Figura 12.5.24. Muestreador DH-48**



**Figura 12.5.25. Mediciones DH-48**

### Muestreadores de peso mediano (16 kg), tipo US DHS-59 (figura 12.5.26)

Este es un muestreador de peso mediano, para su aplicación suspendido desde un cable (figura 12.5.27). Consiste en una botella aerodinámica en forma de “pez”, que permite la medición en aguas cuya profundidad sea menor a cinco metros y cuya velocidad de la corriente no exceda los dos metros por segundo. El operador puede trabajar este tipo de muestreador desde una canastilla suspendida, un bote o un puente.



Figura 12.5.26. Muestreador DH-59



Figura 12.5.27. Mediciones DH-59

Muestreadores pesados (53 kg), tipo DH-74 (figura 12.5.28)

Este es un muestreador pesado, con una válvula de control para el momento de la toma. Consiste en una botella aerodinámica que permite la medición en aguas profundas y en corrientes fuertes. El operador puede trabajar desde un puente (figura 12.5.29) o desde una embarcación lo suficientemente grande con un sistema de suspensión adecuado. Por su peso, no puede ser usado desde canastillas del tipo empleado en México.



Figura 12.5.28. Muestreador DH-74



Figura 12.5.29. Mediciones con DH-74

Observaciones

La mayoría de los muestreadores del tipo "volumen – concentración" funcionan con botellas de vidrio o plástico con un volumen igual o menor a un litro, lo que limita el volumen de sólido colectado e induce un error cuando hay un porcentaje significativo de limo y/o arena en la carga de lavado, por lo que se recomienda obtener varias muestras en el mismo sitio.

VK

### **Equipos para la medición del transporte de fondo; carga de material del lecho**

#### **Muestreador de arrastre de fondo tipo Helley - Smith**

Este tipo de muestreadores son empleados en la medición de la carga de material acarreada en el fondo. El muestreador Helley-Smith (H-S), se diseñó para medir el transporte por arrastre de fondo. Su funcionamiento es por medio de retención de material generalmente arena o grava en una bolsa o malla. Su principio de operación se basa en la diferencia de presión, por lo que se considera un dispositivo del tipo isocinético. Se compone de un marco metálico concebido especialmente para permitir un aterrizaje sobre el lecho, no permite un aterrizaje tan suave como el anterior, además debe ser suspendido de tal forma que la parte trasera del aparato se pose primero en el fondo, de tal manera que la parte delantera no remueva material del fondo. La eficiencia del aparato se ha probado en laboratorio, llegando casi al 90% (Emmet, 1999).

Dependiendo de las condiciones de la corriente se consideran distintas versiones del muestreador, teniéndose: a) de mano (Figura 12.5.30); b) 8020, 8040 y 8065 (Figura 12.5.31)



**Figura 12.5.30. Helley Smith Manual**



**Figura 12.5.31. Helley Smith varios**

#### **Observaciones**

Los muestreadores de arrastre de fondo son en general aparatos de gran tamaño y que tienen un marco metálico como base, que al bajar al fondo, atraviesa flujos de velocidad menores entre la superficie y el lecho del cauce.

VF

A medida que el aparato se encuentra más cerca de la superficie, la fuerza de arrastre producida por la corriente es mayor y origina una inclinación del mismo; sin embargo, esta disminuye a medida que se acerca al fondo.

Una consecuencia de la inclinación del aparato, es que para una profundidad considerable y por lo tanto mayor cable de suspensión, el aparato corre el riesgo de impactarse con el fondo.

En un cauce con existencia de formas de lecho (dunas), se debe colocar al muestreador en la parte alta de la duna, donde el transporte de sedimentos es máximo, ya que una medición en la parte baja induciría errores importantes. Cuando las dunas son pequeñas la posición no importa.

#### Muestreo de material del lecho seco

En México, generalmente no se determinan las características físicas del material del lecho seco, solamente en algunas ocasiones se obtienen muestras por medio de palas, esto solamente en época de estiaje y ríos de alta pendiente donde se puede observar al lecho seco.

#### Muestreo de material del lecho inundado

En el caso del muestreo del material del lecho inundado, existe una diversidad de aparatos, todos básicamente con el mismo principio que consiste en obtener una muestra del fondo por medio mecánico.

#### Dragado a mano (figura 12.5.32).

La draga de mano es un aparato muy sencillo de construir y fácil de operar (figura 12.5.33), aunque no es muy recomendable para obtener muestras de sedimento arcilloso o más grueso que la grava.



**Figura 12.5.32. Draga de mano**



**Figura 12.5.33. Uso de draga**

Muestreador de lecho tipo cavador 180°.

Existen dos versiones de este tipo de muestreador, uno para usarse a mano conocido como US BMH-60 (figura 12.5.34) y uno más pesado para operarse con una grúa o malacate US BM-54 (figura 12.5.35), la aplicación de uno o de otro dependerá de las características del flujo y de la infraestructura disponible.



**Figura 12.5.34. Muestreador US BMH-60**

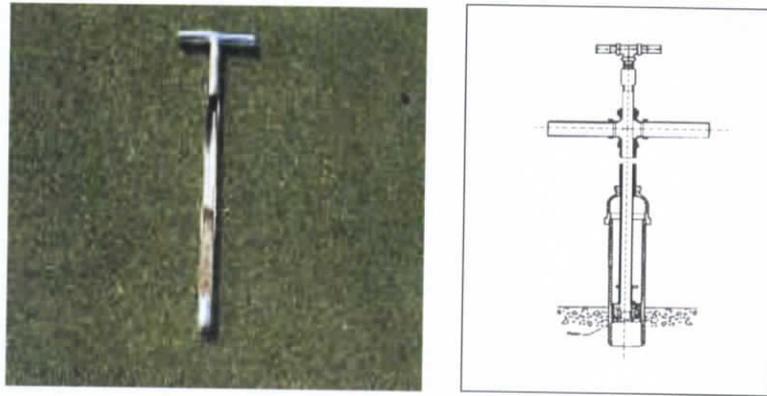


**Figura 12.5.35. Muestreador US BMH-54**

Muestreador perforador ligero de mano (figura 12.5.36).

Cuando se necesita determinar las características del material del lecho debajo de la superficie del mismo, se utilizan muestreadores de perforación. Este aparato es de mano, para su uso en lecho seco o aguas someras.

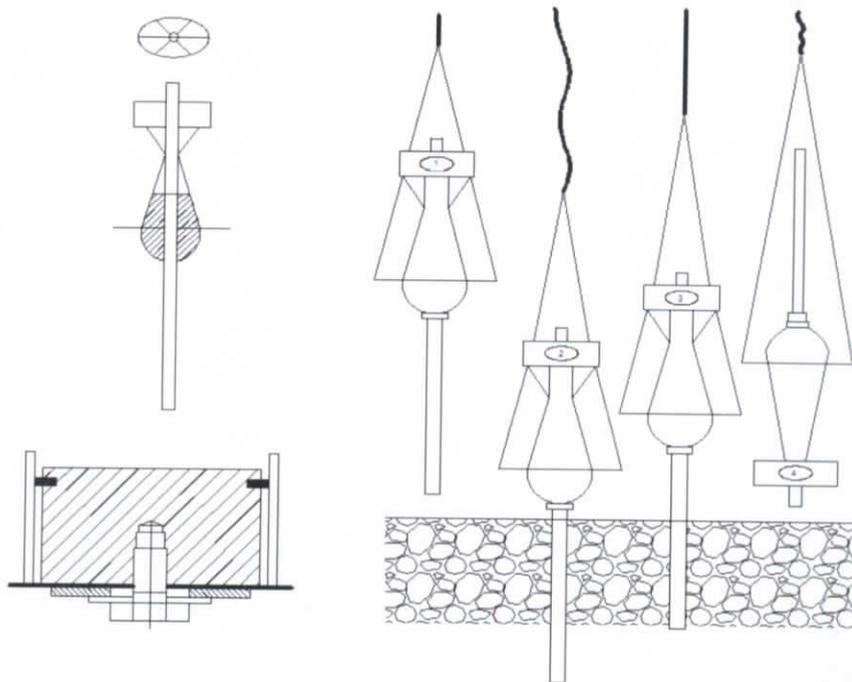
UF



**Figura 12.5.36. Muestreador perforador ligero**

Muestreador perforador para gran profundidad.

En situaciones tales como vasos de presas o lagunas, se debe emplear un penetrador que tenga la capacidad de perforar el fondo ya sea por efecto de su propio peso (figura 12.5.37) o por medio de vibración.



**Figura 12.5.37. Muestreador perforador para tomas de material en zonas profundas  
(Adaptado de Thomas, 1999).**

### Necesidad de recolectar datos

En la actualidad, en las estaciones de medición de sedimentos en México, se recolectan el mismo tipo de datos en todos los sitios, sin importar la demanda, utilidad o necesidad de los mismos.

Se recomienda adaptar los equipos y procedimientos de medición de sedimentos no sólo a los sitios, sino también al uso y demanda de los datos; aunque esta problemática es de por sí muy compleja. En la siguiente lista se identifican algunas de las necesidades y demandas más frecuentes en la medición de sedimentos:

- Medición de la carga de lavado. Se relaciona con los problemas de contaminación y dispersión de contaminantes, pues estos se absorben sobre las partículas finas como son las arcillas, limo fino y material orgánico.
- Medición de la carga total de sedimentos. La medición del transporte total de sedimentos, tanto en suspensión y arrastre de fondo para un tramo de un río, permite establecer un balance de sedimentos, que es útil como en problemas de azolvamiento de vasos y presas.
- Medición de la fracción arenosa de la carga total (suspensión y arrastre de fondo). Este dato es útil para resolver problemas de ingeniería relacionados con la fluviomorfología, tales como erosión de márgenes, dragado, degradación o agradación del cauce, socavación en pilas de puentes, obras de control de lecho o inundaciones, obras de toma para la generación de energía eléctrica, sistemas de riego o para consumo humano.

### **12.5.7 Formatos propuestos**

En el A.12.4, se muestran los formatos propuestos que deben seguirse durante las campañas de medición de sedimentos. Incluyen hojas de aforo, hojas de reconocimiento en campo para secciones de aforo, puntos de interés, infraestructura hidráulica y equipos. Estas hojas son generales y en caso necesario deben adecuarse a las necesidades específicas de la medición.

### 12.5.8 Metodología de cálculo para estimar el balance de transporte de sedimentos

Con la finalidad de establecer el funcionamiento fluviomorfológico de los sistemas estudiados, se debe realizar un balance sedimentológico con la finalidad de identificar distintos procesos presentes a lo largo de los sistemas. Estos cálculos se deben realizar apoyándose en el caudal formativo (a bordo lleno) o en valores muy cercanos a él y en los hidrogramas de funcionamiento anual del sistema y en las necesidades de información.

Ante la baja frecuencia de medición (2 mediciones) es difícil establecer balances de sedimentos; sin embargo, dadas las condiciones de cuasi-permanencia que se obtuvieron en el sistema de la bifurcación y a manera de ejemplo, (pues se necesita un periodo de medición más extenso), se hace un análisis de la información y un balance de los sedimentos. Partiendo de la figura 12.4.58, se tiene lo siguiente:



Tabla 12.5.23. Balance de sedimentos Mezcalapa-Samaria

Río	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>r</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> /d)
Mezcalapa	398.76	6,461.66	9,438.19
Samaria	314.39	1,840.65	8,480.68
		(+) 4,621.01	(+) 957.51

UK

**Tabla 12.5.24. Balance de sedimentos Mezcalapa-Carrizal**

Río	$Q$ ( $m^3/s$ )	$Q_r$ ( $m^3/d$ )	$Q_s$ ( $m^3/d$ )
Mezcalapa	398.76	6,461.66	9,438.19
Carrizal	112.46	779.52	4,166.04
		(+) 5,682.14	(+) 5,272.15

En la tabla 12.5.17, se aprecia que existe una diferencia positiva entre la entrada en el río Mezcalapa y la salida de sedimentos por el río Samaria, tanto de fondo como de suspensión, por lo que existe una amplia zona de depósito.

En la tabla 12.5.18, se aprecia que existe una diferencia positiva entre la entrada en el río Mezcalapa y la salida de sedimentos por el río Carrizal, tanto de fondo como de suspensión, esto se traduce como una amplia zona de depósito, que en este caso se queda atrapado en la zona de la obre de control.

Ambas consideraciones son bastante simples, pues hace falta una cantidad mayor de datos para relacionar con el caudal líquido y la hidrología, y así poder establecer pronósticos de mediano y largo alcance.

Se deben construir curvas sedimentológicas con un amplio rango de valores y ajustar ecuaciones que predigan el comportamiento de los sedimentos. Estas mediciones se deben complementar con modelos numéricos y físicos para entender el funcionamiento fluviomorfológico de la zona y hacer un adecuado manejo de los sedimentos.

UF

## 12.6 ACCIONES PARA EL CONTROL Y MANEJO DE LOS SEDIMENTOS

Actualmente en México no existen programas exclusivos para la medición de sedimentos, pues estos se limitan a estaciones de medición climatológicas, hidrológicas, hidroclimatológicas y estaciones de medición de calidad del agua (mediciones rutinarias de concentración de sólidos cerca de la superficie), teniendo en las estaciones hidrológicas y de calidad del agua como base de referencia una metodología de los años cuarenta. A partir de estos valores medidos, se calculan gastos sólidos, muchas veces a partir de suposiciones poco confiables sin verificaciones formales (J. J. Peters, 1998).

Debido a la falta de interés en la medición de sedimentos, los procedimientos de toma de muestras y determinación de gastos sólidos resultan bastante primitivos, lo que da origen a errores significativos cuando no se tiene el suficiente cuidado. El uso de los datos recolectados en campo, en la mayoría de los casos sirve solamente para alimentar bases de datos que son rara vez utilizadas, o en la mayoría de los casos no se les da una interpretación apropiada, debido a la falta de experiencia y conocimiento del tema.

Aunque el país cuenta con una tradición de estudios sedimentológicos y fluviales, el empleo de datos de sedimentos (sobre todo transporte de arrastre) no es una práctica común, en muchos casos debido a la dificultad en la obtención de datos de sedimentos y en otras como fue comentado, debido al desconocimiento del fenómeno. No es raro encontrar desde una total indiferencia al fenómeno y su valor, hasta un sobredimensionamiento del mismo, esto debido al poco entendimiento del proceso de transporte de sedimentos en general. En este sentido se debe hacer una reflexión cuidadosa sobre el valor real de los datos de sedimentos, entendiéndose que la obtención de datos de cualquier tipo carece de sentido si no se les da una aplicación práctica.

Los datos de sedimentos proporcionan información sobre el comportamiento fluvial y sedimentológico de un río, sin limitarse solamente al aspecto hidráulico; sino, que se relaciona al transporte líquido con el transporte sólido, siendo este último el responsable de la evolución y cambio de condiciones del río.

En México la medición rutinaria de los ríos, se trabaja con manuales que datan de los años 50's, y aunque han sido actualizados (Comisión Nacional del Agua, 1998), estos tratan principalmente sobre el aforo de corrientes y la medición del gasto de lavado (Kennedy et al, 2000); es decir, el gasto sólido se relaciona solamente con el material transportado cerca de la superficie.

Este tipo de medición se justifica solamente para algunas estaciones en la época de estiaje, donde el transporte de fondo no es significativo; sin embargo, no es útil en la época de avenidas donde se encuentran altas tasas de transporte de sedimentos de fondo que no son considerados. Así al obtener el transporte en suspensión total, simplemente multiplicando el valor de sedimentos en suspensión por un factor constante, da lugar a errores significativos. Sobre todo en aquellos ríos donde el material transportado es más grueso que limos finos y arcillas, como pueden ser arenas y gravas.

En general no existen en México mediciones rutinarias del transporte de arrastre de fondo, por lo que tratar de inferirlo a partir de ecuaciones empíricas, que en la mayoría de los casos no son calibradas y subestiman o sobreestiman la capacidad real de transporte del río; o se intenta inferir a partir de la carga en suspensión, lo cual implica errores graves, especialmente durante la época de avenidas donde la carga de fondo es mucho mayor.

Aunado a la dificultad de medición de sedimentos, las estaciones de medición forman parte de la red hidrométrica, por lo que en muchos de los casos no se cumplen las condiciones adecuadas para medir el transporte de sólidos. Se requiere por lo tanto hacer una revisión cuidadosa sobre todo en la calidad de los datos recolectados, pues en muchas ocasiones estos se asignan a personal poco calificado y sin una certificación previa. Por lo que la calidad de las mediciones que se han generado en las últimas décadas, aparte de ser muy pobre, no presentan buenas condiciones de confiabilidad.

El interés que presenta la medición de sedimentos, tiene un alto valor económico de los datos para la gestión de los recursos hídricos, tal como la operación y manejo de sistemas hidroeléctricos, de riego, navegación, protección contra inundaciones, protección ambiental, riego, agua potable y abastecimiento, etc.

Por lo tanto existe una necesidad evidente de revisar los métodos y procedimientos actuales de medición, para ajustarlos y mejorarlos y así obtener mediciones de carga de lavado confiables; además, se recomienda iniciar la medición rutinaria de transporte de arrastre de fondo.

En lo que respecta a la medición de la corriente líquida, generalmente no se hace de manera simultánea con la medición del transporte de sedimento. Esto debido generalmente a que solamente se acostumbra diseñar con datos hidráulicos y no con su complemento sedimentológico. Y aunque se están empleando tecnologías modernas para el aforo (Equipos Doppler), no se cuenta con la capacitación ni los conocimientos necesarios para asegurar una buena calidad, por lo que se siguen generando errores significativos en los procedimientos. Se recomienda que las compañías encargadas de llevar a cabo estos procedimientos sean certificadas en el uso, manejo y procesamiento de la información obtenida de estos equipos.

La separación de los componentes líquido - sólido en diseños fluviales, solamente puede aceptarse bajo ciertas condiciones, por ejemplo en aquellas que el transporte sólido no sea significativo, o bien para diseños de obras hidráulicas de pequeña magnitud; sin embargo, en general el problema debe tratarse como de un flujo bifásico, en el cual se debe considerar la medición de la corriente de manera simultánea con la medición del gasto sólido, e incorporar la medición de la geometría de la sección.

En la mayoría de los casos las fuentes de sedimentos, la geología del terreno, la geotécnica de las márgenes, la orografía de la cuenca, las pendientes de los cauces, las zonas de inundación, las zonas de erosión y depósito de sedimentos, son elementos que no son tomados en cuenta en el establecimiento de las redes de medición. Estos elementos, así como la elección de los aparatos y las estrategias de medición; son fundamentales para lograr un entendimiento fluvio-geomorfológico de los ríos.

Aunado a estos estudios, se recomiendan la determinación de las características del material del fondo a lo largo de los ríos, así mismo como una toma de material del lecho ocasional durante los períodos estacionales.

En las estrategias de medición a futuro, se propone hacer una revisión a los procedimientos de adquisición de datos y programas de mantenimiento de equipo, llevar a cabo procesos de certificación y supervisión periódica de las campañas de medición tanto de aforo líquido como sólido. En la figura siguiente se muestra un diagrama de flujo de sobre la forma adecuada de llevar a cabo los estudios y procedimientos.



**Figura 12.6.1. Diagrama de flujo de procedimientos de medición**

Se prevé una transición lenta hacia la introducción de nuevos aparatos y métodos de medición; sobre todo, debido a la gran dificultad y el alto costo para medir sedimentos, la gran extensión de las redes, los escasos recursos humanos calificados, la infraestructura inadecuada y las herramientas para el mantenimiento y supervisión de las mediciones que son prácticamente inexistentes.

Por lo tanto es esencial iniciar una cultura de medición de sedimentos, donde se debe empezar por identificar las necesidades básicas de medición, en función de la demanda de los siguientes datos:

- sedimento transportado en suspensión o carga de lavado
- sedimento transportado en suspensión o carga de material del lecho
- sedimento transportado cerca del fondo
- sedimento transportado en el fondo o arrastre de fondo

Las estrategias de medición propuestas en este estudio, sentaran las bases para iniciar un entendimiento de los procesos fluviomorfológicos presentes, así como sensibilizarse sobre los usos y aplicaciones de los datos de sedimentos. La estrategia final se debe discutir conjuntamente con los involucrados en el manejo y conservación de los recursos hídricos, para a su vez incluir en el alcance de los estudios, información adicional a la propuesta y que impacte en la calidad de estudios adicionales (¿Por qué medir?).

El primer paso que se propone debe ser el diagnóstico completo de los sistemas (Estudio geomorfológico y estudio fluviomorfológico). De manera simultánea se deben realizar campañas anuales de medición de sedimentos. Después del primer año, se deben evaluar los resultados y hacer las modificaciones pertinentes en cuanto a la frecuencia de medición y tipo de dato recolectado.

En la siguiente tabla se resumen las acciones que deben llevarse a cabo el manejo y control de los sedimentos.

**Tabla 12.6.1. Acciones para el manejo y control de los sedimentos**

Acción	Objetivo	Frecuencia
Revisión, capacitación y certificación de mediciones con equipos Doppler	Asegurar la calidad de las mediciones con equipos Doppler	Anual
Revisión de estaciones hidrométricas	Hacer un inventario de las estaciones hidrométricas que tengan las características apropiadas para la medición rutinaria de sedimentos	Una inicial y después cada 5 años
Proponer estaciones de medición de sedimentos	Generar la red de estaciones de medición de sedimentos	Una vez
Revisión, capacitación y certificación en mediciones con equipos de medición de sedimentos	Asegurar la calidad de las mediciones con equipos Doppler	Anual
Establecer campaña de medición de sedimentos en estiaje	Generar base de datos sedimentológicos durante estiaje	Anual durante periodo de estiaje, con una medición cada dos semanas

ESTUDIO PARA EL PROYECTO HIDROLÓGICO PARA PROTEGER A LA  
POBLACIÓN DE INUNDACIONES Y APROVECHAR MEJOR EL AGUA  
(PROHTAB)

Acción	Objetivo	Frecuencia
Establecer campaña de medición de sedimentos durante avenidas	Generar base de datos sedimentológicos durante avenidas	Anual durante periodo de avenidas, con una medición semanal
Realizar estudio geomorfológico de cada corriente	Obtener la línea base para identificar las zonas de equilibrio y desequilibrio fluvial y relacionar los cambios a mediano plazo (5 años)	Una inicial y después cada 5 años
Realizar estudio fluviomorfológico de cada corriente	Generar el diagnóstico fluvial base de cada corriente que será monitoreada	Una inicial y después cada 5 años
Realizar campaña de medición de sedimentos en canales derivadores	Generar base de datos sedimentológicos	Anual durante periodo de avenidas
Realizar monitoreo de capacidad de tasa de azolve en zonas reguladoras (lagunas)	Determinar la tasa de azolvamiento en zonas lagunar	Anual antes y después de la temporada de avenida
Realizar estudios geomorfológicos y de transporte de sedimentos en bancos de extracción de material	Determinar la tasa de equilibrio para extracción de material	Anual en cada banco de extracción de material
Realizar estudios geomorfológicos y fluviomorfológicos en zonas propuestas para dragado	Determinar ejes de acarreo de material y trayectorias óptimas para realización de dragado dirigido	Anual en cada zona susceptible a dragado
Realizar estudios geomorfológicos y de transporte de sedimentos en obras de cruce (Puentes)	Generar diagnóstico sobre el estado de erosión local en márgenes y pilas de puentes.	Inicial en cada puente y después cada 5 años



## 12.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio de caracterización y cuantificación de los sedimentos, en el estado de Tabasco, permitió detectar y visualizar el funcionamiento de algunos de los sistemas fluviales y jerarquizar su importancia. En este orden se consideraron los siguientes sistemas, los cuales a partir de los estudios realizados permitieron generar las siguientes observaciones e interrogantes:

**Tabla 12.7.1. Observaciones a los sistemas estudiados**

Sistema	Observación	Interrogantes
Platanar	Es un gran aportador de material grueso al sistema Mezcalapa	Cuál es la cantidad de sedimento aportado anualmente
Comuapa	Este río no es un gran aportador de material grueso	
Bifurcación Mezcalapa-Samaria-Carrizal	Se están generando cambios morfológicos fuertes en el sistema	Cuáles serán los cambios en el sistema, será posible el cierre del río Carrizal
González	En la zona del río González se apreciaron velocidades altas, con transporte de sedimentos significativo	Cuál es el destino de los sedimentos
Chilapilla	Este es un canal derivador que mete gran cantidad de material a la zona lagunar	Cuál es la tasa de elevación del suelo en esa zona. Cuál es su área de influencia
El Censo	Es un canal derivador de gran magnitud que aporta una cantidad de sedimentos en suspensión significativa a la zona de regulación	Cuál es la evolución en la zona de regulación, cuál es la tasa de crecimiento y azolve de la zona, que influencia tiene los demás canales derivadores

Aunque los estudios realizados aportan algunos elementos, sus resultados, aún son limitados. Esto debido principalmente a la baja frecuencia de medición que tuvieron.

Se recomienda hacer campañas de mediano alcance, que cubran al menos el periodo de un año, para así empezar a generar la historia sedimentológica y fluviomorfológica de los ríos, pues si bien, las mediciones puntuales son útiles para tratar problemas particulares, un análisis general debe sustentarse en una campaña de mediciones lo suficientemente robusta, que permita hacer inferencias y pronósticos a futuro.

Con los datos recolectados en el presente estudio, solamente se tiene un panorama limitado, que solamente tiene valides en el rango de medición, el cuál en la mayoría de los casos fue limitado.

De igual forma los estudios deben considerar zonas amplias, con una escala de medición a gran y mediano alcance. A partir de estas campañas se estará en posibilidad de enfocarse a puntos específicos del sistema, pero siempre teniendo el conocimiento del funcionamiento general del mismo.

Se recomienda extender los sistemas, como se propuso en el apartado de estrategias de medición, y debido a que la medición de sedimentos es un proceso complejo, se debe ser cuidadosos en las metodologías y procedimientos empleados.



## 12.8 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua (1994), "Instructivo de medición de sedimentos", Subdirección general de Administración de agua, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos.

Comisión Nacional del Agua, (1998a), "Instructivo para el aforo de corrientes", Subdirección general de Administración de agua, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos.

Comisión Nacional del Agua (1998b), "Actualización para aforadores – Hidrometría", CFE-División Hidrométrica Golfo.

Comisión Nacional del Agua, (2000), "Libro del Agua Región XI, Frontera Sur", Gerencia Regional Frontera Sur, Subgerencia Regional de Programación, México.

García Flores M. y Maza Álvarez J.A. (1998), "Origen y propiedades de los sedimentos". Series del Instituto de Ingeniería. UNAM, México. No. 601. Pp. 111.

Helena Cotler Ávalos (2010), "Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización", INECC, México, Pp 232

ISO 4363:2002 "Measurement of liquid flow in open channels -- Methods for measurement of characteristics of suspended sediment", Pp. 27.

J. J. Peters (1998), "Diseño de sistemas (métodos y procedimientos) aplicables en México para la medición de sedimentos en suspensión y arrastre de fondo". Programa de Modernización del manejo del agua en México. (PROMMA). Informe Final. No. 12. Ginebra, Suiza.

J. J. Peters (1998a), "Seminario sobre sedimentología". Programa de Modernización del manejo del agua en México. (PROMMA). Informe Final. No. 12. Ginebra, Suiza.

J. J. Peters. (1977) "La méthode des dragages dirigés applications" Laboratoire de recherches hydrauliques, Belgique. Pp.65.

Kennedy Pérez A., Fragoza Díaz F., Peña Peña F y Morena Bañuelos J.E. (2000), "Manual de Aforos", IMTA, Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje, México D.F. Pp 137

Martín Vide J, (2002), "Ingeniería de Ríos", Universitat Politècnica de Catalunya, España. Pp 331

Ricly Hidrological Company, (2002), "Hydrological Instrument Equipment", USA, Pp. 250

Rivera F., Alejandro L., Sánchez P., Vega P. y Quintanilla A. (2004), "Determinación de la distribución de sedimentos en una bifurcación. Caso de estudio", XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica Cd. Sau Paulo. Brasil.

Rivera F., Alejandro L., Sánchez P., Vega P. y Quintanilla A. (2003), "Estudio de sedimentos del sistema de los ríos Mezcalapa-Samaria-Carrizal, Estado de Tabasco. 3a. Etapa", Reporte Interno, Secretaría de Comunicaciones Asentamientos y Obras Públicas del Estado de Tabasco. México, Pp. 1050.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (1948), "Instructivo para estudios de azolves (2ª. Edición)" Dirección General de Hidrología, irrigación y Control de Ríos.

Szupiany, R. N., M. L. Amsler, D. R. Parsons, and J. L. Best (2009), Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences, *Water Resour. Res.*, 45, W05415, doi: 10.1029/2008WR007428.

Thomas K. Edwards and G. Douglas Glysson (1999), "Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey", Chapter 2, Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment. USGS.

