

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE
SEDIMENTOS SUSPENDIDOS UTILIZANDO INSTRUMENTOS ÓPTICOS
(OBS- 3A) Y ACÚSTICOS (ADCP) EN LA BAHÍA DE TUMACO – DELTA DEL
RÍO MIRA**

DANIEL ANTONIO LEÓN BLANCO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y DE LA EDUCACION

INGENIERIA FÍSICA

POPAYÁN

2007

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE
SEDIMENTOS SUSPENDIDOS UTILIZANDO INSTRUMENTOS ÓPTICOS
(OBS- 3A) Y ACÚSTICOS (ADCP) EN LA BAHÍA DE TUMACO – DELTA DEL
RÍO MIRA**

DANIEL ANTONIO LEÓN BLANCO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Físico

Director:

Ing. Leonairo Pencue Fierro

Codirector:

Mg. Juan Camilo Restrepo

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

INGENIERIA FÍSICA

POPAYÁN

2007

Nota de Aceptación

Director

Ing. Leonario Pencue-Fierro

Jurado

Mg. Jorge W. Coronel

Jurado

Ing. Diego Bravo

Fecha de sustentación: Popayán, 15 de Mayo de 2008

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo técnico, logístico y profesional del Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), y en especial de su Área de Manejo Integral de la Zona Costera (AMIZC) y el grupo de Investigación en Morfodinámica Litoral. A los trabajadores de cada una de esas dependencias, y en general a todo el personal civil y militar que conforma este centro de investigación, muchas gracias.

Un especial agradecimiento al Mg. Juan Camilo Restrepo, director investigativo del grupo de Morfodinámica Litoral, durante mi pasantía en el CCCP, y codirector de éste trabajo, por sus valiosos aportes y sugerencias, pero sobre todo por su paciencia y dedicación para ayudarme a comprender muchos de los aspectos que giran en torno al estudio de los sedimentos, un tema desconocido para mí. También a Germán Bastidas y Clara Natalia Celis del laboratorio de Química del CCCP, y a Marta Bastidas de Área de Oceanografía por su apoyo profesional, pero más aún por ser como mi familia durante mi estadía en la ciudad de Tumaco.

De igual forma agradezco al Ing. Leonairo Pencue, director de éste trabajo, por su colaboración y apoyo en la elaboración de éste documento, y en el planteamiento general de la investigación.

Y por último, pero más importante, agradezco a mi Familia (Jaury, Lucy, Diego, Lina y JuanJo) por ser mi soporte en todo lugar y momento.

2.4.2	Medidas de concentración: Muestreadores sedimentos en suspensión	30
2.4.2.1	Muestreadores iso – cinéticos	30
2.4.2.2	Muestreadores no iso-cinéticos	32
2.4.2.3	Muestreadores de sedimento depositados en el lecho de los ríos	32
3. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN		
3.1	Instrumento Óptico: Optical Backscatter	34
3.1.1	Principio de funcionamiento	34
3.1.2	Optical Backscatter: OBS-3A	36
3.1.3	Factores que afectan la medición	37
3.1.3.1	Tamaño de los sedimentos	37
3.1.3.2	Composición mineral de los sedimentos	38
3.1.3.3	Rango de medición	38
3.1.3.4	Burbuja y material biológico	39
3.2	Instrumento Acústico: Acoustic Current Doppler Profiler	41
3.2.1	Principio de funcionamiento	41
3.2.2	Corrección de la señal acústica	43
3.2.2.1	Monitoreo de los sedimentos con el ADCP	43
3.2.2.2	Corrección geométrica	44
3.2.2.3	Atenuación del sonido por el agua	44
3.2.2.4	Atenuación del sonido por las partículas en Suspensión	46
3.2.2.5	Sensibilidad del instrumento	47
3.2.2.6	Respuesta del ADC	48
4. MEDIDAS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1	Calibración del OBS – 3A	51
4.1.1	Tamizado de las muestras	51

4.1.2	Procedimiento y montaje de calibración	53
4.2	Mediciones de concentración con el OBS – 3A	57
4.2.1	Relación entre la turbidez y la concentración	60
4.3	Estimación de concentración con el ADCP	62
4.4	Muestreo conjunto	68
4.4.1	Bocatoma del acueducto de Tumaco: Delta del río Mira	68
4.4.2	Bahía de Tumaco	75
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
6.	BIBLIOGRAFÍA	83

LISTA DE TABLAS

		Pág
Tabla 1.1	Principales características del río Mira	21
Tabla 2.1	Principales características de los sedimentos	27
Tabla 4.1	Calibración del OBS – 3A	56
Tabla 4.2	Medidas de concentración con el OBS-3A.	71
Tabla 4.3	Medidas de concentración a partir de muestras de agua recolectada con botellas Niskin.	71
Tabla 4.4	Promedio del nivel de eco registrado por los tres transductores.	71

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	Principales deltas colombianos, clasificación de Galloway. 20
Figura 1.2.	Ubicación geográfica de la bahía de Tumaco 22
Figura 2.1	a) Tamaño de los sedimentos, b) clasificación de Udden-Wendworth 25
Figura 2.2	Representación esquemática de la dinámica de los sedimentos. 28
Figura 2.3	Muestreadores iso-cinéticos. 31
Figura 2.4	Muestreadores no iso-cinéticos. 33
Figura 3.1	a) Luz transmitida. b) Luz esparcida. 36
Figura 3.2	a) <i>Optical Backscatter</i> -OBS-3A. b) Esquema del sensor OBS. 36
Figura 3.3	Factores que afectan la medida del OBS. 40
Figura 3.4	a) <i>Acoustic Current Doppler Profiler</i> –ADCP. b) Esquema de medición del ADCP. 42
Figura 4.1	Cantidad de sedimentos por tamiz 52
Figura 4.2	Montaje de calibración del OBS – 3A 55
Figura 4.3	Curva de calibración del OBS – 3A 56
Figura 4.4	Mediciones de turbidez y concentración con los dispositivos OBS-3A, referencias 207 y 204. 59
Figura 4.5	Relación entre los registros de concentración y turbidez tomados con el OBS – 3A 61
Figura 4.6	Atenuación del sonido por las partículas en suspensión 64
Figura 4.7	Registro de la velocidad y dirección de la corriente, y variación temporal y espacial del nivel de eco, ADCP 65
Figura 4.8	Aplicación de la rutina de conversión de <i>counts</i> a nivel de eco. 67

Figura 4.9	Esquema de muestreo para la medición de caudal de ríos, recomendado por el USGS	68
Figura 4.10	Comparación entre los registros de concentración tomados con una botella Niskin y el dispositivo OBS.	72
Figura 4.11	Velocidad de la corriente en una sección del río Mira	73
Figura 4.12	Comparación entre el nivel de eco medido por los diferentes transductores del ADCP.	74
Figura 4.13	a) Registros de concentración tomados con un OBS – 3A y una botella Niskin. b) Altura de la columna de agua sobre el OBS.	77
Figura 4.14	Nivel de eco registrado por el ADCP	79
Figura 4.15	Relación entre el nivel de eco y concentración	80

GLOSARIO Y TÉRMINOS ABREVIADOS

ADCP: *Acoustic Doppler Current Profiler.*

Ápice: Extremo superior o punta de algo.

CCCP: Centro Control Contaminación del Pacífico.

CCS: Concentración de sedimentos en suspensión.

Deltas y estuarios: Desembocadura del río en el mar.

Escorrentía: Agua de lluvia que discurre con un terreno.

Facies sedimentarias: Características externas de los sedimentos.

Flóculos: Grumos

Litoclástico: De las rocas

OBS: *Optical Backscatter.*

USGS: *United States Geological Survey.*

RESUMEN

En los últimos años, la utilización de dispositivos ópticos (e.g. *Optical Backscatter* -OBS) y acústicos (e.g. *Acoustic Doppler Current Profiler* - ADCP) ha permitido monitorear con mayor resolución la variabilidad temporal y espacial de la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en ambientes costeros y estuarinos. Sin embargo, la aplicación de estos mecanismos en ambientes tropicales ha tenido un desarrollo incipiente. Con el fin de implementar dichos instrumentos para realizar mediciones de CSS en el sistema deltaico del río Mira - Costa Pacífica colombiana (un ambiente costero tropical en donde algunos factores oceanográficos - e.g. oleaje, marea- y estuarinos -e.g. descargas fluviales- son determinantes en su evolución), se desarrolló un procedimiento de calibración para un dispositivo OBS, tomando como patrón de calibración sedimento seco y desagregado de la zona de estudio. Además, se corrigió la respuesta del ADCP para que pueda ser útil en la estimación de CSS, teniendo en cuenta la atenuación del sonido por el agua y las partículas en suspensión, así como la dispersión geométrica del haz acústico.

INTRODUCCIÓN

Los rasgos geomorfológicos, el transporte de nutrientes hacia el océano, el paso de la luz a través del mar, así como los cambios en la línea de costa y la topografía submarina (son solo algunos de los procesos ligados a la concentración de sedimentos suspendidos (CSS) (Meadows y Campbell, 1981). Sin embargo, y a pesar de la importancia de la concentración de sedimentos en los flujos biogeoquímicos y en los procesos geomorfológicos, resulta complejo cuantificar este parámetro debido a su alta variabilidad temporal y espacial, y estrecha relación con procesos oceanográficos (i.e. oleaje, marea) y estuarinos (i.e. descargas fluviales, estratificación) (Dyer, 1995).

Para determinar la CSS se han utilizado instrumentos como turbidímetros, trampas de sedimento, muestreadores mecánicos y botellas Niskin (USGS, 1999). Estos instrumentos son de carácter intrusivo porque modifican las condiciones físicas del muestreo (i.e. velocidad de captura, volumen de muestra), y por lo tanto conducen a imprecisiones en la estimación de la CSS (Creed et al, 2001). Además, sólo permiten mediciones puntuales, lo que impide hacer una estimación temporal y espacial con alta resolución de los cambios en la CSS (Holdaway et al, 1999).

En los últimos años se han utilizado con óptimos resultados instrumentos ópticos (e.g. OBS) y acústicos (e.g. ADCP) para estimar la CSS (i.e. Holdaway et al, 1999; Alvares y Jones, 2001; Kostaschuk et al 2004). El OBS- *Optical Backscatter*, es un sensor óptico que mide turbidez y CSS detectando radiación infrarroja retroesparcida¹ por las partículas en suspensión (Creed et al, 2001). El ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*, es un dispositivo acústico utilizado principalmente para hacer perfiles de corriente, emitiendo pulsos sonoros a través de la columna de agua y registrando la intensidad y frecuencia del eco reflejado por las partículas en

¹ En este trabajo se utiliza el término *esparcimiento* para denotar al efecto de redistribución de la energía cuando ésta incide sobre un grupo de partículas, en vez del término *dispersión* que está más asociado al fenómeno de descomposición de la luz en sus diferentes longitudes de onda constitutivas

suspensión. Recientemente se ha demostrado que la intensidad de la señal registrada es proporcional a la CSS (Thorne y Hannes, 2002). Tanto el OBS como el ADCP permiten realizar mediciones durante largos periodos de tiempo sin interferir directamente con la dinámica de los sedimentos en suspensión. Además, el ADCP al emitir pulsos a lo largo de la columna de agua es capaz de registrar variaciones espaciales de la CSS (Gartner, 2002).

Para que estos dispositivos puedan ser utilizados en la medición de la CSS deben atravesar diferentes procesos de ajuste y calibración, teniendo en cuenta algunas características tanto del sedimento como de la zona de estudio. Para la calibración del OBS es necesario conocer, o estimar, el valor máximo de concentración esperado, el tamaño promedio de los sedimento, así como su composición (i.e arena, lodo, material biológico); que son algunas de las características que afectan la respuesta del equipo. La salinidad y la temperatura del agua determinan en gran medida la velocidad de propagación del sonido, al igual que el grado de atenuación en intensidad que sufre la señal durante su desplazamiento. Por lo tanto, es necesario ajustar el valor de amplitud de la señal registrada por el ADCP para que sea dependiente, únicamente, de los sedimentos en suspensión y pueda ser un indicador de su concentración. (Lohrmann, 2001).

Recientes reportes del uso del OBS y el ADCP en la medición de la CSS muestran el alto desempeño de estos dispositivos de medida (Creed et al, 2001; Dinehart y Burau, 2005; Fettweis et al, 2006). Sin embargo, no se tienen reportes del uso de esta tecnología en ambientes tropicales. En Colombia se han implementado, principalmente, métodos de medida indirecta para estimar el transporte y la CSS. En la bahía de Tumaco – delta del río Mira se calculó el volumen de sedimento y transporte potencial por medio de la evaluación de cambios multi-temporales en la línea de costa y la aplicación de ecuaciones analíticas (i.e USCORP, Kamphuis) en las que se consideran la energía incidente del oleaje y el ángulo de aproximación con respecto a la costa, además, información del sedimento como: tamaño, porosidad y densidad. Sin embargo, estos métodos presentan resultados dispares que no permiten hacer una estimación aproximada del transporte de los sedimentos y mucho menos de su

concentración (CCCP, 2003). Por su parte, en la bahía de Cartagena, se han utilizado imágenes SPOT y simulaciones numéricas para determinar los principales mecanismos de formación de los patrones de la pluma turbia en la bahía (Lonin et al, 2004).

Este trabajo, enmarcado en el proyecto “Modelo de morfodinámica litoral para definir escenarios de vulnerabilidad ante amenazas naturales: bahía de Tumaco-delta del río Mira” (desarrollado por el Área de Manejo Integral de la Zona Costera – AMIZC – del Centro Control Contaminación del Pacífico – CCCP – junto con la Universidad EAFIT, con el apoyo financiero de COLCIENCIAS - Código: 12160517616) pretende, comparando entre sí los resultados arrojados por cada uno de los instrumentos, y cotejándolos además con muestras de agua de la zona, determinar las ventajas y desventajas del uso de estos dispositivos en mediciones de CSS en ambientes tropicales, como la bahía de Tumaco – delta del río Mira. Se busca además, describir un procedimiento de calibración para el OBS, así como, precisar las diferentes correcciones a las que se debe someter la respuesta del ADCP para que pueda utilizarse como un indicador de la CSS.

En el capítulo 1, se presenta una breve descripción de la zona de estudio, incluyendo algunas de las importantes implicaciones que tiene el estudio detallado de los sedimentos. En el capítulo 2, se hace un recuento acerca de la dinámica de los sedimentos, y se muestran algunas de las técnicas empleadas tradicionalmente para estimar su concentración y su transporte. El capítulo 3, trata sobre los dos dispositivos utilizados en este estudio (OBS-3A y ADCP). En el capítulo 4, se discuten y exponen los resultados encontrados en este estudio. Por último, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones más relevante encontradas durante la realización de éste proyecto, además, en éste mismo capítulo se ponen a consideración algunos aspectos a tener en cuenta en futuros trabajos en los que se desee implementar instrumentos ópticos y/o acústicos en el estudio de la dinámica de los sedimentos.

CAPÍTULO 1

DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los ríos son vitales para la subsistencia de cualquier asentamiento humano. Son fuente de energía, funcionan como una fuente de agua potable y, debido a su flujo en una sola dirección, se convierten en un recurso hídrico renovable, además son fundamentales como vías de comunicación y sistema de regadío. En contraste con lo anterior el río puede representar a su vez una amenaza: inundaciones, sequías, deslizamientos, y teniendo en cuenta la influencia antrópica, fuente de contaminación. Así, el desarrollo de los asentamientos humanos están íntimamente ligado al manejo adecuado de los recursos hídricos fluviales (Restrepo, 2005)

Por si fuera poco, los ríos se convierten en agentes de cambio del paisaje terrestre, teniendo en cuenta que los sistemas fluviales no sólo transportan grandes volúmenes de agua de los continentes hacia el mar, sino que también remueven a su paso gran cantidad de material sólido como partículas de suelo y roca (Restrepo, 2005). Los deltas y estuarios, donde el río finalmente se conecta con el mar, deben su constante evolución, en gran medida, a éste tipo de aportes fluviales (Restrepo y Correa, 2002).

1.1. PRODUCCIÓN Y SUMINISTRO DE SEDIMENTOS

La erosión (independiente de su causa) en el área de la región o cuenca hidrográfica representa una fuente importante de sedimentos (Suárez, 2001). Una de las principales causas naturales de erosión son las precipitaciones o lluvias. Cuando la lluvia cae sobre el terreno parte de ella es filtrada por el suelo (proceso de infiltración) para después moverse hasta alcanzar de forma subterránea lagos, río y océanos. Para el caso en el que los niveles de precipitación superen la capacidad de absorción de la tierra, el agua fluye superficialmente hacia los lagos y sistemas

fluviales, proceso que se conoce como escorrentía (Restrepo, 2005), uno de los componentes fundamentales del ciclo hidrológico, y además uno de los elementos de mayor influencia en el desprendimiento, transporte y depósito de sedimentos.

El suministro de sedimentos desde las cuencas continentales es determinado en primera instancia por la tasa a la cual las áreas fuente son erodadas (Restrepo, 2005). No sólo la escorrentía controla estos procesos de erosión, existen otros factores naturales y humanos que contribuyen de manera significativa, algunos de ellos son: la configuración del relieve (pendiente, longitud), las características tectónicas, la deforestación, la minería y la adecuación de tierras para ganadería, entre los más importantes. La cobertura vegetal juega también un papel importante, aunque no en el proceso de transporte, si no en la dinámica de ciclo hidrológico, ya que la extensión de la vegetación es determinante en los índices de infiltración y escorrentía, que en últimas, controlan los procesos de transporte.

La cantidad de sedimento que se erosiona anualmente por cada kilómetro cuadrado de área continental, se determina a partir del total de sedimentos en suspensión que salen o están cerca a la desembocadura de un río, dividido por el área total y aguas arriba que drena el sistema hidrográfico, medido en kilómetros cuadrados (Restrepo, 2005).

1.2. LOS SEDIMENTOS: INDICADORES AMBIENTALES

Los procesos que ocurren en los terrenos de la cuenca hidrográfica, cambios en el uso de suelo o las prácticas de deforestación y agricultura, alteran la cantidad y calidad (debido a la aplicación de fertilizantes en los suelos) de las aguas y sedimentos en los ríos, lagos, estuarios y zonas costeras. De esta manera, los problemas ambientales se trasladan entre sectores de la cuenca hidrográfica, desde la parte alta hasta la zona costera (Restrepo, 2005).

Los contaminantes pueden ser transportados de forma disuelta o de manera sólida-asociada, como flóculos. Gran parte del material disuelto es polvo (partículas de suelo), emisiones biológicas de la vegetación viva, emisiones volcánicas, emisiones antropogénicas, y nutrientes (nitrógeno, fosforo, carbón orgánico) vitales para la supervivencia de plantas y animales. La mayor contribución de la carga disuelta es causada por las reacciones químicas entre agua, rocas y minerales. Por su parte, los sólidos (partículas con tamaños superiores a $0.45 \mu m$) transportan sustancias adjuntas o incorporadas, que pueden ser minerales, fragmentos de rocas o suelos, e incluso material orgánico micro o macroscópico, como bacterias, zooplancton o fitoplancton. Además de nutrientes y materiales inorgánicos, en los sistemas acuáticos es común encontrar contaminación por metales pesados. Estos metales pueden ser divididos en dos grupos de acuerdo a su fuente de producción: litogénicos (geoquímicos) y antropogénicos (hechos por el hombre). En la primera categoría están el zirconio, rubidio y el estroncio, derivados de material rocoso afectado por acción natural del clima. La segunda categoría consisten en metales introducidos por actividades humanas (refinerías, minas, etc.), los metales más comunes son: cromo, níquel y cobalto, zinc, cadmio y mercurio. También es frecuente encontrar, adjunto a los sedimentos, abundante cantidad de aceites como: hidrocarburos grasos, jabones, grasas, ceras y aceites minerales (Van Rijn, 1993).

1.3. LOS SEDIMENTOS Y LA FORMACIÓN DE DELTAS Y ESTUARIOS

Los deltas y estuarios son el producto del depósito rápido de sedimentos transportados por los ríos hacia los mares y océanos. La principal diferencia entre unos y otros esta dada por la distancia con respecto a la desembocadura del río en el que se da la mezcla de agua dulce y salada. Así, para un delta esta mezcla se realiza costa afuera de la desembocadura fluvial, mientras que para un estuario ésta se da en la parte final y más ancha del río. Las influencias mareales también son un factor determinante en la diferenciación entre delta y estuario. En los deltas predominan las influencias fluviales sobre las marinas. Como consecuencia se forman depósitos de sedimentos que avanzan y recubren la plataforma continental que obliga, a largo

plazo, al mar a retirarse, fenómeno que se conoce como regresión marina depositacional. Por el contrario en los estuarios, donde es mayor la influencia marina, el flujo y el reflujo de la marea (subiente o bajante) conducen a un estancamiento temporal de los sedimentos, de ésta forma no se dan acumulaciones importantes (de sedimentos) en la desembocadura, o desembocaduras, del río.

A su vez lo deltas han sido clasificados teniendo en cuenta diferentes métodos y criterios; sin embargo la división más utilizada es aquella propuesta por Galloway en 1975; en ésta los deltas se clasifican en: (i) delta fluvial, donde predominan los aportes líquidos y sólidos del río; (ii) delta de tipo estuarino, en donde predominan los efectos mareales; y (iii) delta con predominio de las acciones marinas, asociadas al oleaje. Los deltas que presentan una combinación de diferentes factores hidrodinámicos, se conocen como deltas mixtos.

Los principales ríos colombianos han sido clasificados teniendo en cuenta las anteriores categorías (Figura 1.1). De esta forma, se reconocen como deltas de tipo fluvial al delta del río Atrato (ubicado en el golfo de Urabá, Darién colombiano) y el delta del río Sinú (localizado al sur del Golfo de Morrosquillo); como delta de ola (asociado al oleaje) se presenta el del río Magdalena; y un ejemplo de delta mixto se da en la desembocadura del río San Juan, en el Pacífico, a 50 kilómetros del la ciudad de Buenaventura (Correa y Restrepo, 2002). Dentro de esta misma clasificación el delta del río Mira puede entenderse como un delta oimixto, pero con una mayor influencia de las fuerzas producto del oleaje (Restrepo y López, 2007).

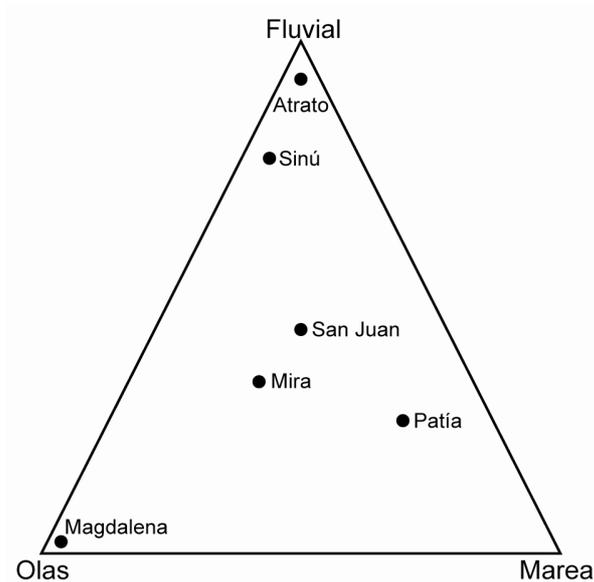


Figura 1.1. Principales deltas colombianos, de acuerdo a la clasificación de Galloway (Tomada y modificada de Correa y Restrepo, 2002).

1.4 DELTA DEL RÍO MIRA: UBICACIÓN Y CONDICIONES SEDIMENTARIAS

La bahía de Tumaco constituye la mayor entrante de la costa Pacífica colombiana con un área de 350 km², caracterizada por una alta pero relativamente constante temperatura, altas tasas de precipitaciones y altos índices de humedad. El delta del río Mira tiene una superficie subaérea de 520 km², que se extiende desde el ápice ubicado aproximadamente a 20 km de la línea de costa. El delta está compuesto por un sistema de descarga principal localizado en cabo Manglares y siete distributarios menores al sur y al norte del canal principal (Figura 1.2). Entre las principales características del río Mira (Tabla 1.1) se destaca su descarga sólida en suspensión, estimada en 9.77 x 10⁶ toneladas por año (Restrepo y López, 2007), ya que constituye junto con la carga de los ríos Patía y San Juan cerca del 50% del aporte de sedimentos de los ríos del Pacífico colombiano, que se calcula en ~ 96 x 10⁶ toneladas por año.

Ésta zona se caracteriza por cambios de marea semidiurnos. Dentro del delta se presentan diferentes rangos mareales promedio. Para la zona conocida como Bocana Milagros de 2.1 metros (Rango de marea alta mensual de 2.6 metros, y rango de marea baja mensual de 1.6 metros), y para el sitio denominado Bocana Nueva de 2.7 metros (Rango de marea alta mensual de 2.7 metros, y rango de marea baja mensual de 1.1 metros). El delta del río Mira se caracteriza además por la presencia de trenes de olas (en aguas profundas) que varían entre los 0.29 y 2.33 metros de altura, y periodos que oscilan entre los 5 y 23 segundos. La dirección predominantes de dichas olas es sur-este y sur-oeste (Restrepo y López, 2007).

En cuanto a las características físicas del sedimento en esta zona, el estudio de las facies sedimentarias (aspectos o características externas de los sedimentos) de la plataforma continental, desarrollado conjuntamente por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) y la Misión Técnica Francesa, indican que el fondo de la bahía está compuesto por sedimentos finos que varían entre arenas y lodos de origen litoclástico. Muestreos puntuales adelantados por CCCP (CCCP, 2003) indican que en estos sitios se presentan arenas finas a lodosas, con un D_{50} que varía entre 0.3 mm y 0.1 mm., con una densidad de sedimento que oscila entre 2.2 gr cm^{-3} y 3.1 gr cm^{-3} y una porosidad media del 26%.

L	A	R	r	Q	Δf	Q_s
(km)	(m ²)	(m)	(mm año ⁻¹)	(m ³ s ⁻¹)	(mm año ⁻¹)	(t año ⁻¹)
272	9 530	3 346	4 703	868	2 872	9.7 x 10 ⁶

Tabla 1.1. Principales características del Río Mira. L, longitud de río. A, área de la cuenca de drenaje. R, mayor elevación dentro de la cuenca. r, Promedio anual de precipitaciones. Q, descarga del río (caudal). Δf , escorrentía. Q_s , carga de sedimentos en suspensión. (Tomada y modificada de Restrepo y López, 2007).

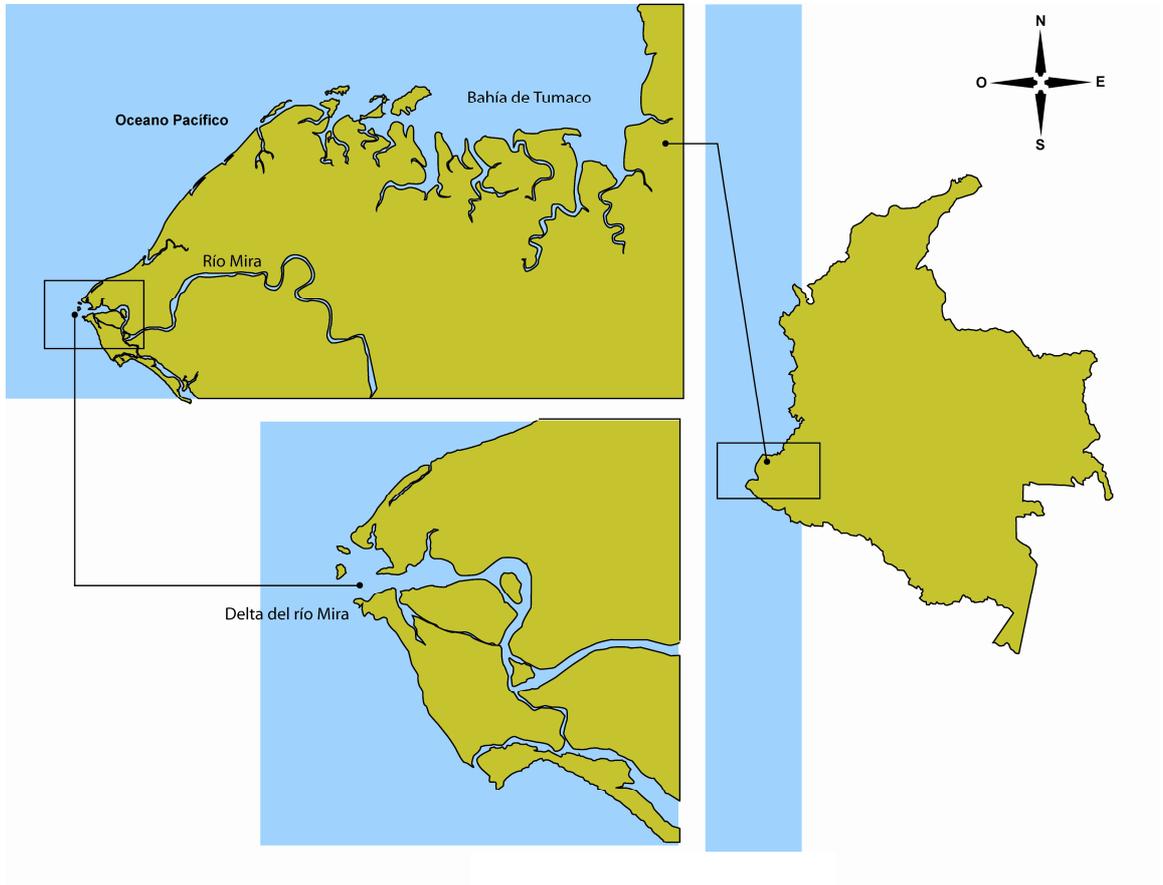


Figura 1.2. Ubicación geográfica de la Bahía de Tumaco

CAPITULO 2

GENERALIDADES SOBRE LOS SEDIMENTOS

2.1. SEDIMENTOS: Definición

El sedimento es el material orgánico e inorgánico que es transportado por agentes físicos como: el viento, las olas, la corriente y la gravedad. Los sedimentos presentes en las zonas costeras pueden ser importados de ambientes externos o producidos localmente. A escala global los sedimentos importados, producto de la continua erosión de una región y su depósito en otra, constituyen el 92% del sedimento en la zona costera, siendo el río la mayor fuente de estos (Masselink y Hughes, 2003).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS

2.2.1 Masa, densidad y peso específico

La masa del sedimento afecta directamente su inercia a las fuerzas aplicadas por el fluido en movimiento. La masa se convierte en una variable importante dado que de ésta depende la densidad del sedimento, propiedad determinante en la posibilidad que tienen los sedimentos para permanecer en suspensión. Sin embargo, no es la masa la variable más importante para hablar de la densidad de los sedimentos, es aun más relevante el tipo de mineral que lo compone (Masselink y Hughes, 2003). Los sedimentos inorgánicos se componen principalmente de cuarzo (arenas) y arcillas. Éstas últimas poseen estructuras que cambian fácilmente (floculación) bajo la influencia de fuerzas electrostáticas (fuerzas cohesivas) en ambientes salinos. La composición de los sedimentos conlleva a una poca variación en su peso

específico, lo que hace que la propiedad más importante de los sedimentos, en cuanto al transporte se refiere, sea el tamaño (Martín, 2000). Por su parte, la mayoría de los sedimentos presentes en la bahía de Tumaco son de origen rocoso, con una densidad que fluctúa entre los 2.2 gr cm^{-3} y los 3.1 gr cm^{-3} .

2.2.2 Tamaño

Para determinar el tamaño del sedimento es necesario realizar, como mínimo, tres mediciones diferentes: la longitud mayor (eje L), intermedia (eje I) y menor (eje C) (Figura 2.1a). Para los sedimentos gruesos estas mediciones se pueden hacer directamente con un calibrador, mientras que para partículas pequeñas se utilizan métodos de tamizado o de inspección microscópica (Masselink y Hughes, 2003). Para sedimentos compuestos por arcillas se utilizan métodos de análisis hidráulicos, usando la velocidad de sedimentación y comparándola con algunos estándares de velocidad. También se utilizan con frecuencia técnicas electrónicas, como el contador Coulter, u ópticas, a partir de la difracción de luz láser (Van Rijn, 1993).

El sedimento puede ser clasificado de acuerdo a su tamaño usando el esquema Udden-Wentworth (Figura 2.1b). Este esquema utiliza la longitud intermedia de sedimento como criterio de clasificación. Para designar un tamaño de sedimento se utiliza la nomenclatura D_n , que determina que el $n\%$ del peso del material es menor a D . Se emplea con mucha frecuencia D_{50} , que es la mediana de la distribución (Martín, 2000). En el esquema de clasificación de Udden-Wentworth se utilizan dos tipos de escala para el tamaño: escala en milímetros y escala phi (escala- φ). Esta última se utiliza a menudo para hacer representaciones de distribución de tamaños (Van Rijn, 1993). Para pasar de una escala a la otra se emplea la siguiente conversión (Masselink y Hughes, 2003):

$$\begin{aligned} D &= 2^{-\varphi} \\ \varphi &= -\log_2 D \end{aligned} \tag{2.1}$$

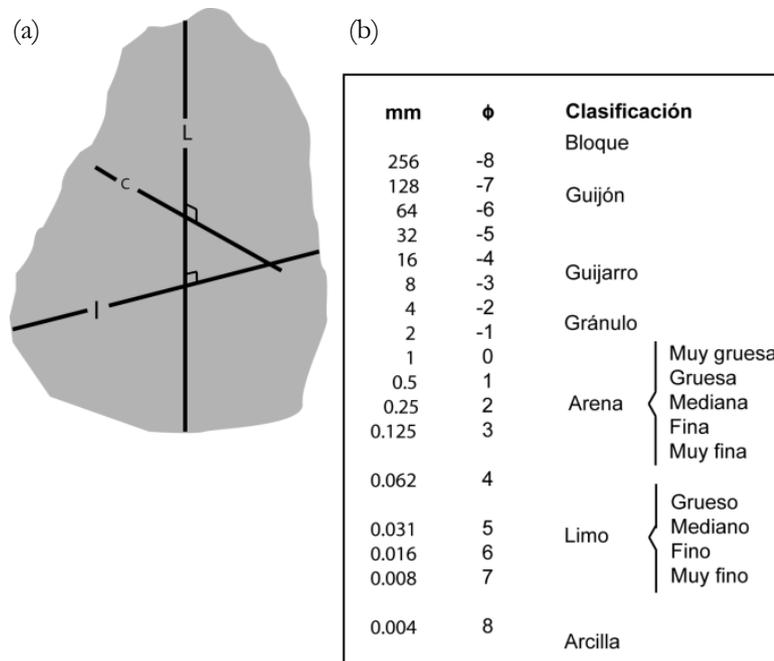


Figura 2.1. a) Definición de longitud larga, intermedia y corta. b) Esquema de Udden-Wentworth para la clasificación del sedimento por tamaño. (Tomada y modificada de Masselink y Hughes, 2003)

El sedimento presente en la bahía de Tumaco tiene un tamaño promedio de 0.2 mm. Éste tamaño lo ubica dentro de la clasificación de Udden-Wentworth como una arena fina.

2.2.3 Forma y redondez

La forma del sedimento se define usando la relación entre los ejes de longitud (L, I, C). La relación entre los ejes L-I indican el grado de elongación del sedimento, mientras que la relación entre los ejes S-I indica su aplanamiento. La forma del sedimento es un parámetro importante que influye directamente en el transporte. Por ejemplo, un sedimento plano es más difícil de arrastrar y se asienta más lentamente que uno esférico (Masselink y Hughes, 2003). La forma normalmente se describe con el factor de forma (SF, *shape factor*) de Corey (Van Rijn, 1993):

$$SF = \frac{L}{(I \times S)^{0.5}} \quad (2.2)$$

La redondez no debe ser confundida con la forma, por ejemplo, una esfera es claramente redondeada. En este caso, la redondez se refiere a las esquinas y protuberancias del sedimento. El grado de redondez hace referencia al desgaste químico y mecánico, por abrasión, que ha experimentado el sedimento (Masselink y Hughes, 2003).

2.2.4 Porosidad

Tan importante como las propiedades individuales de los sedimentos (forma o densidad) son sus características en conjunto. De acuerdo a la forma de los sedimentos estos pueden agruparse de diferentes maneras; para el caso ideal de sedimentos esféricos, se tendrían dos tipos de configuraciones posibles, cúbica y romboédrica. Independiente del tipo de empaquetamiento que forme un conjunto de sedimentos van a existir espacios vacíos entre ellos, el volumen de estos espacios se conoce como porosidad (Masselink y Hughes, 2003).

2.2.5 Concentración

El conjunto de sedimentos organizados por paquetes va a tener un valor de densidad dado por la masa total de sedimentos dividido por el volumen del paquete (granos más el espacio entre ellos). Directamente relacionado con este valor de densidad se encuentra la concentración de sedimento, que será la relación entre el volumen total de sedimentos y el volumen total del paquete de sedimentos, granos y huecos. Para el caso de sedimentos finos, la densidad total del paquete y la concentración, son factores que controlan la habilidad de los sedimentos para ser transportados por las olas y la corriente (Masselink y Hughes, 2003). Debido a la acción de la gravedad se espera que la mayor concentración de partículas esté cerca al fondo (Monsalve, 1995).

Principales características se los sedimentos	
<i>Características individuales</i>	
Masa, densidad y peso	Estas propiedades, determinadas por la composición mineral de los sedimentos, afectan directamente su inercia
Tamaño	Se deben realizar tres medidas: longitud mayor, menor e intermedia. A partir de ésta última los sedimentos son clasificados, algunas de las categorías son: arenas, limos y arcillas.
Forma y redondez	La forma indica el grado de elongación del sedimento: plano o esférico. Por su parte la redondez hace referencia a las esquinas y protuberancias del sedimento
<i>Características en conjunto</i>	
Porosidad	Se refiere al espacio entre sedimentos cuando estos se encuentran empaquetados
Concentración	Se define como la relación entre el volumen total de sedimentos y el volumen total del paquete de sedimentos, incluidos los espacios entre ellos.

Tabla 2.1. Principales características de los sedimentos

2.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Es posible distinguir entre dos tipos de transporte de sedimentos: uno en suspensión y otro de fondo; aunque no existe un límite bien definido entre los dos. Por acción de la fuerza de gravedad el sedimento tiende a depositarse en el fondo, sin embargo una fuerte corriente puede reintroducirlo a la columna de agua (Monsalve, 1995). Este proceso se puede explicar a través de la siguiente secuencia: (i) Arrastre de sedimento de fondo hacia arriba, debido a la fuerza que ejerce el fluido; (ii) la transferencia de momentum por parte del fluido a los sedimentos hace que estos se muevan, este proceso se presenta tanto para material de fondo como para aquel que está en suspensión, el tamaño del material de fondo puesto en suspensión depende de la intensidad de la corriente del fluido (Martín, 2000); (iii) el efecto de la gravedad hace que los sedimento se depositen nuevamente en el fondo; (iv) sin embargo, dependiendo de la velocidad con la que los sedimentos se decanten, que es relativa a la velocidad con la que

las condiciones del flujo cambien, la secuencia de transporte vuelve a comenzar (Masselink y Hughes, 2003).

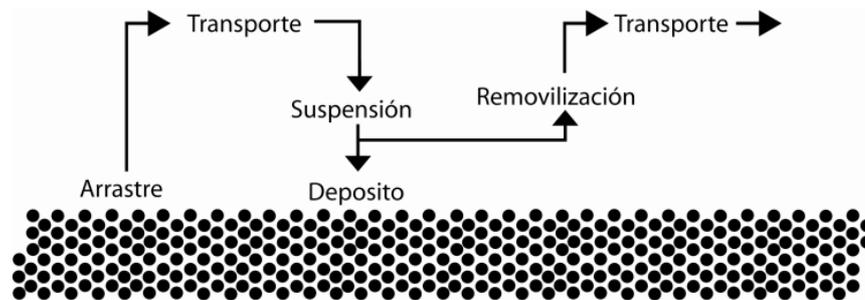


Figura 2.2. Representación esquemática de la dinámica de los sedimentos (Tomada y modificada de Masselink y Hughes, 2003)

2.4 MEDIDAS Y ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE Y LA CONCENTRACIÓN DE LOS SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

A continuación se describen algunas de las técnicas experimentales más utilizadas para medir concentración de sedimentos en suspensión, así como los métodos numéricos y analíticos utilizados en la estimación potencial del transporte de sedimentos.

2.4.1. Métodos para la estimación de transporte

El principal método para estimar el transporte potencial de sedimentos, consiste en la aplicación de una serie de ecuaciones matemáticas, cuyas variables son las principales características de los sedimentos, antes mencionadas. También existen otros métodos “alternativos”, como por ejemplo, estimaciones a partir de la evolución histórica de la línea de costa.

2.4.1.1 Ecuaciones de transporte

Este tipo de ecuaciones se derivan a partir de la ecuación potencial clásica o curva de calibración que relaciona la concentración de sedimentos (C) y el caudal (Q) volumen de agua en unidad de tiempo).

$$C = aQ^b \quad (2.3)$$

Donde, a , se conoce como coeficiente de calibración, que es la medida numérica de la concentración en un caudal específico; b , es el exponente de calibración, representa la pendiente de la relación entre C y Q , en un plano *log-log*, a partir de éste valor es posible estimar el grado de ajuste potencial entre las variables (Restrepo, 2005).

A modo de ejemplo, uno de los sistemas de ecuaciones más utilizados: La ecuación de Kamphuis publicada en 1991 (CCCP, 2003). Éste sistema involucra características de los sedimentos de la zona, tales como su porosidad, su densidad promedio y el tamaño (D_{50}), además, emplea otras variables como la densidad del agua, la altura y el promedio de los puntos de ruptura y el ángulo de aproximación del oleaje con respecto a la línea de costa.

Kamphuis:

$$S = 64433X_{Kamphuis} \left[\frac{m^3}{año} \right], \quad (2.4)$$

donde, $X_{Kamphuis}$, es el coeficiente de Kamphuis, y se calcula de la siguiente manera:

$$X_{Kamphuis} = \frac{1}{(1-p)\rho_s} \left(\frac{\rho}{T_p} \right) L_o^{1.25} H_{bs}^2 (\tan \alpha_k)^2 \left(\frac{1}{D_{50}} \right)^{0.25} (\text{sen} 2\theta_b)^{0.5},$$

donde, p , es la porosidad; ρ y ρ_s , son la densidad del agua y del sedimento, respectivamente.

2.4.1.2 Estimación de transporte a partir del cambio en la línea de costa

Éste método de estimación surge partir de la comparación de imágenes de la línea de costa, registradas bien sea por fotografías de satelitales o aérea, tomadas durante intervalos de tiempo considerables (años) en los que se pueda determinar variaciones significativas. Sin embargo, se debe tener cuidado durante el análisis de la información ya que el cambio de la línea de costa no sólo se debe a las descargas de los ríos, sino también, y en gran medida, a la intervención humana (construcciones civiles) y a los fenómenos naturales (tsunamis, El Niño, etc.) (CCCP, 2003).

2.4.2 Medidas de concentración: Muestreadores de sedimentos en suspensión

Estos dispositivos son construidos normalmente con forma hidrodinámica para evitar obstruir el flujo de la corriente (Figura 2.3). Retienen una cantidad de agua que posteriormente es filtrada, con lo que se obtiene el peso del sedimento presente en la muestra; conociendo este valor y el volumen de la muestra, se calcula la concentración (Monsalve, 1995). Se dividen en dos clases: Muestreadores iso-cinéticos y muestreadores no iso-cinéticos.

2.4.2 .1 Muestreadores iso-cinéticos

Los muestreadores iso-cinéticos están diseñados para tomar una muestra representativa de sedimento de forma continua e iso-cinética, es decir, que la velocidad con la que el líquido ingresa al muestreador es igual a la velocidad con la que éste fluye. Los muestreadores se dividen en dos grupos teniendo en cuenta la forma en la que son sujetados para descender y ascender a través de la columna de agua: (i) Sujetos a mano (*hand-held*); (ii) de cable y carrete (USGS, 2003). La figura 2.4 muestra a manera de esquema un muestreo realizado con uno de estos dispositivos, teniendo en cuenta una mayor CSS cerca del fondo.

La cantidad de agua que ingresa al muestreador se controla a través de dos métodos. El primero, considera el tamaño de la boquilla, en donde su diámetro está relacionado con el volumen de agua recolectada. El segundo método consiste en modificar la velocidad de

descenso y ascenso del muestreador, si éste permanece poco tiempo dentro del agua recolectará menor cantidad de agua (USGS, 1997).

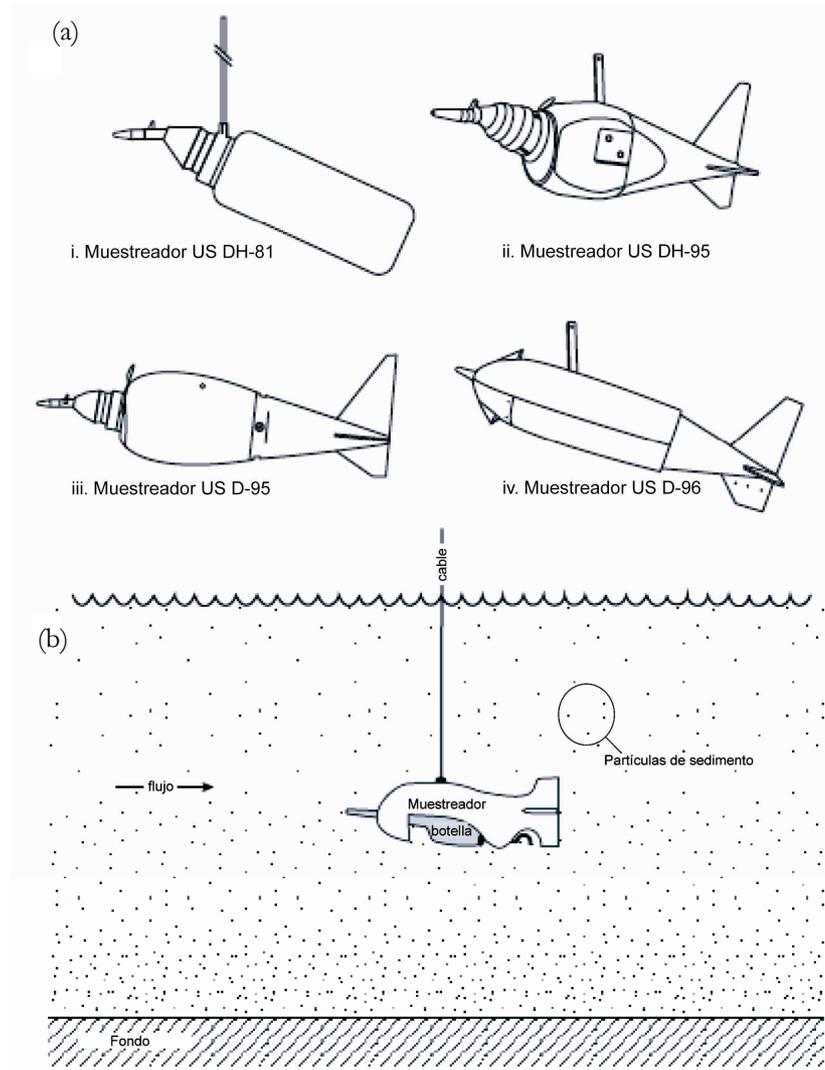


Figura 2.3. Muestreadores de sedimento iso-cinéticos. **a).** La figura i. representa un muestreador de mano, los demás son de cable y carrete. (Tomada y modificada de USGS, 2003). **b)** Esquema de la recolección de sedimento con un muestreado iso-cinético (Tomada y modificada de USGS, 1997).

2.4.2.2 Muestreadores no iso-cinéticos

Su nombre se deriva del hecho de que la velocidad con la que el fluido ingresa al dispositivo es diferente a la velocidad con la que éste se mueve. Estos instrumentos son utilizados en lugar de los muestreadores iso-cinéticos, cuando no se cumplen las condiciones mínimas y máximas de velocidad y profundidad necesarias (USGS, 2003).

Los muestreadores no iso-cinéticos se dividen en diferentes clases (Figura 2.4). De acuerdo a su diseño, las principales categorías son: muestreadores de boca abierta, muestreador ladrón (*thief sampler*), muestreadores de un sola etapa (*single-stage sampler*), muestreadores automáticos y bombas extractoras. La utilización de cada uno de estos dispositivos está determinada por el lugar de muestreo. En estuarios es común utilizar éste tipo de muestreadores ya que permiten obtener muestras de agua instantáneas y discretas (USGS, 2003), es decir, muestras puntuales de concentración. Los más utilizados son: el muestreador Kemmerer, el muestreador Van Dorn, y los dispositivos de doble válvula de desagüe (USGS, 2003). Un tipo de dispositivos Van Dorn son las botellas Niskin (Figura 2.4d).

2.4.2.3 Muestreadores de sedimento depositado en el lecho de los ríos

Estos muestreadores funcionan por diferencia de presión. La entrada de agua consiste inicialmente en un estrechamiento con subsiguiente expansión (forma de embudo) que causa una disminución de presión, y una posterior disminución de la velocidad, que facilita la retención del sedimento (Monsalve, 1995).

Como la mayoría de estos dispositivos requieren muestras físicas de sedimento, inducen turbulencia en el flujo, lo que produce suspensión adicional de sedimentos, obteniendo de este modo medidas poco fiables (Kostanschuck et al, 2004). Recientes avances tecnológicos en el campo de la óptica y la acústica han permitido desarrollar instrumentos para realizar mediciones *in situ* de concentración de sedimentos en suspensión, a partir de dispositivos no intrusivos de fácil manejo (Creed et al, 2001).



Figura 2.4. Muestreadores de sedimento no iso-cinéticos tipo ladrón (Tomada y modificada de USGS, 2003).

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTOS DE MEDIDA

3.1. INSTRUMENTO ÓPTICO: *Optical Backscatter*

3.1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los parámetros físicos que caracterizan la luz, en general a la radiación electromagnética, (e.g longitud de onda, frecuencia, intensidad, potencia) se modifican cuando esta interacciona con la materia. Determinar la condición inicial y final de algunos de estos parámetros, después de una interacción luz-materia, va a permitir extraer valiosa información sobre el ente que generó ese cambio. Uno de los parámetros que mejor caracteriza a la luz, y de cuyo cambio se va a poder obtener mayor información las partículas, es la intensidad. Éste parámetro se define como el promedio de la cantidad de energía que cruza en una unidad de tiempo un área perpendicular a la dirección del flujo de luz (Born y Wolf, 1999).

Cuando la radiación electromagnética interacciona con un grupo de partículas de pequeño tamaño, por ejemplo, induce oscilaciones entre las cargas eléctricas de la materia, los dipolos así inducidos emiten ondas secundarias en todas direcciones (Olsen, 1986), ésta radiación secundaria tendrá un valor de intensidad diferente al de la radiación incidente. Bajo este principio físico se han construido diferentes instrumentos de medida, uno de ellos es el turbidímetro, instrumento que mide turbidez, o grado de transparencia de un fluido. Esta variación en intensidad depende principalmente de la absorción y el esparcimiento (*scatter*) de la radiación por parte de las partículas en suspensión (Figura 3.1a). En el esparcimiento no hay cambio en la energía total de la radiación, sólo una redistribución de ella fuera de la dirección

de incidencia. Cuando las dimensiones de las partículas que causan el esparcimiento no superan el 5-10% de la longitud de onda incidente se conoce como dispersión Rayleigh, y cuando éstas son superiores en tamaño al 10% de la longitud de onda se conoce como dispersión por partículas grandes. En la absorción, una parte de la energía incidente se convierte en calor, lo que hace que ésta sea un poco más difícil de estudiar. La cantidad de radiación que es absorbida depende principalmente de (i) la composición química, tamaño, forma, número y distribución de las partículas; (ii) la composición química del medio; (iii) y la frecuencia y polarización de la radiación incidente. La cantidad de energía esparcida es mayor en comparación a la que se convierte en calor debido al proceso de absorción (Webster, 1999), por lo tanto cuando se hacen mediciones de turbidez sólo se tiene en cuenta la radiación esparcida.

Existen otro tipo de configuraciones posibles. Una de ellas se da si el sensor se ubica de forma tal que entre él y la fuente de luz exista un ángulo de separación de 90°; en este caso, la señal registrada, es decir la variación de intensidad de la radiación, no dependerá de la cantidad de luz que atraviese la muestra, si no, de la cantidad de luz que sea esparcida por ésta (Figura 3.1b). El dispositivo que cumple con esta condición se conoce como nefelómetro. El OBS es un tipo de nefelómetro (Garnet y Gray, 2003), en el que la fuente de luz y el sensor se encuentran en el mismo lugar, es así como la radiación registrada corresponde a la cantidad de luz que regresa al dispositivo, después de interactuar con las partículas en suspensión. Este tipo de radiación se conoce como radiación retroesparcida (*backscatter*).

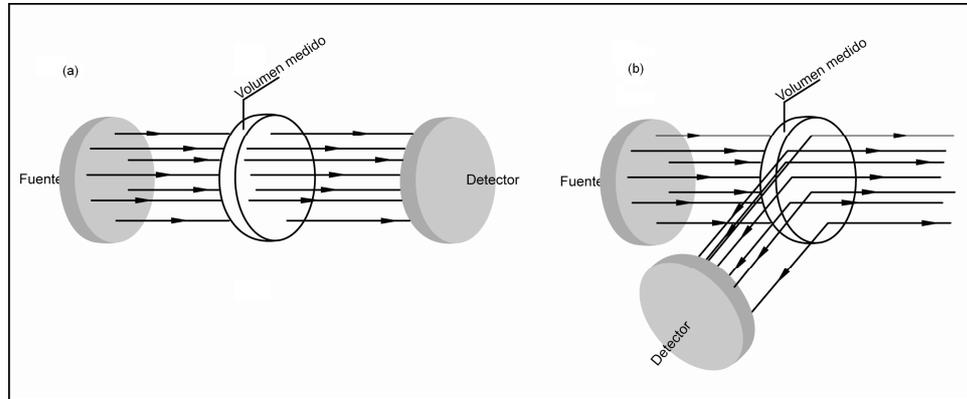


Figura 3.1. a) Luz transmitida. **b)** Luz esparcida (Tomada y modificada de Van Rijn, 1993)

3.1.2. *Optical Backscatter* OBS – 3A

El *Optical Backscatter* – 3A (OBS - 3A) (Figura 3.2a) es uno de los dispositivos para el monitoreo de la CSS más utilizados actualmente. La parte más importante de éste dispositivo es su sensor OBS que mide la turbidez y la concentración de sólidos en suspensión, al detectar la radiación en el infrarrojo cercano que es retroesparcida por las partículas en suspensión. El esquema fundamental de este sensor se muestra en la figura 3.2b.

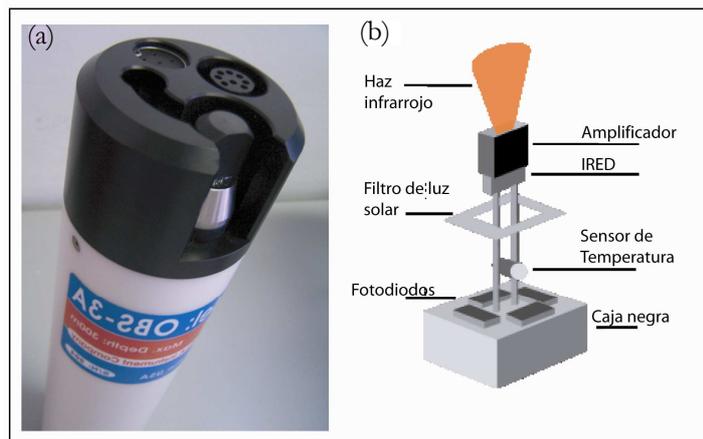


Figura 3.2. a) OBS-3A. D&A Instruments. **b)** Esquema de un sensor OBS (Tomado y modificado del manual de operación del OBS-3A, D&A Instruments, 2004)

El diodo de emisión infrarroja (IRED), cuyo pico de longitud de onda es 875 nm, produce un rayo cónico con una abertura de 50°. La radiación retroesparcida entre 140° y 160°, que es detectada por el arreglo formado por los cuatro fotodiodos, después de pasar a través de un filtro de desecho de luz solar, es proporcional a la turbidez y a la CSS (D&A Instrument, 2004). El arreglo de fotodiodos convierte la cantidad de radiación registrada en una diferencia de potencial, que debe ser expresada en términos de la concentración de sólidos en suspensión (*mg/l*). Esta conversión de unidades se realiza a partir de una calibración previa efectuada en un laboratorio, usando muestras de sedimentos provenientes de la zona que se pretende estudiar (Alvarez, 2002).

3.1.3. FACTORES QUE AFECTAN LA MEDICIÓN

Las características de los sedimentos (e.g tamaño, composición, concentración), y de la zona de muestreo (e.g salinidad, temperatura, material biológico) afectan directamente la respuesta del OBS (D&A Instruments, 2004); de allí la importancia de los procesos de calibración, y análisis de los sedimentos. A continuación se describen algunos de los factores que afectan la medición del OBS – 3A.

3.1.3.1. Tamaño del sedimento

La respuesta del dispositivo no es uniforme si el tamaño de las partículas cambia en función del tiempo, ya que el área específica de las partículas determina la intensidad de la luz retroesparcida (D&A Instruments, 2004). Es decir, la cantidad de radiación que retroesparce (dirección contraria a la dirección de propagación de la onda incidente) un conjunto de partículas depende del tamaño de las partículas que lo conforman. Así, un conjunto conformado por partículas “pequeñas” esparcirá energía con mayor intensidad que un conjunto de partículas “grandes”, debido a que la radiación secundaria (esparcida) generada por el conjunto de partículas pequeñas permanecerá prácticamente en fase, dando pie a una interferencia constructiva, en otras palabras, a un aumento en la amplitud de la señal.

El cambio brusco en el tamaño de los sedimentos es una situación regular en las zonas costeras y estuarinas debido a la variación en el comportamiento de los agentes marinos y fluviales (Fettweis, 2006). La figura 3.3a muestra la relación, inversamente proporcional, entre el tamaño de los sedimentos (micrómetros) y la ganancia del equipo ($V/g/l$).

3.1.3.2. Composición mineral del sedimento (Color)

El color del sedimento está relacionado con el tipo de mineral que lo compone. La composición mineral de los sedimentos juega un papel importante en las mediciones de la CSS con instrumentos ópticos, como el OBS-3A, ya que algunos minerales como la calcita reflejan con mayor facilidad la radiación infrarroja que otros minerales como la magnetita (D&A Instruments, 2004). En la Figura 3.3b se muestra el índice de reflectancia de infrarrojo para diferentes tipos de minerales. Los minerales han sido organizados de acuerdo a su color siguiendo el sistema de clasificación del color de Munsell; que clasifica los colores de acuerdo a su tinte o matiz, valor o brillo (0 para negro 10 para blanco) y su saturación o unidades de croma (con color completamente saturado no contiene mezclas de blanco).

3.1.3.3. Rangos de medición

De acuerdo a las condiciones de muestreo de cada uno de los sensores que componen al OBS-3A se tendrán ciertos rangos de funcionamiento, es decir, intervalos de medida en los que el OBS-3A tendrá un alto desempeño. En el caso de mediciones de CSS, el sensor OBS del OBS-3A impide registrar de manera confiable valores de concentración que superen los $5 g/l$. A altas concentraciones (e.g $> 5 g/l$) la señal infrarroja emitida por el IRED va a ser fuertemente atenuada por las partículas en suspensión (D&A Instruments, 2004) (Figura 3.3c).

3.1.3.4. Burbujas y material biológico

Al igual que los sedimentos en suspensión, el material biológico y las burbujas presentes en el agua van a esparcir radiación infrarroja. Sin embargo, no toda la radiación retroesparcida es registrada por el OBS-3A. Solo la radiación retroesparcida que se encuentre dentro del rango

de 140° y 160° será censada; dentro de éste rango son los minerales los que realizan el mayor aporte de radicación (D&A Instruments, 2004), (Figura 3.3d). Sin embargo, la presencia de grandes concentraciones de burbujas puede generar errores en la estimación de la CSS con los dispositivos OBS. Se ha demostrado que una alta presencia de burbujas puede generar sobreestimaciones en el valor de concentración (~25%), aunque esta influencia se hace menor para conjuntos de sedimentos compuestos principalmente por lodos (~5%); ésta sobre estimación en los registros disminuye a medida que aumenta la salinidad (Puleo, 2004).

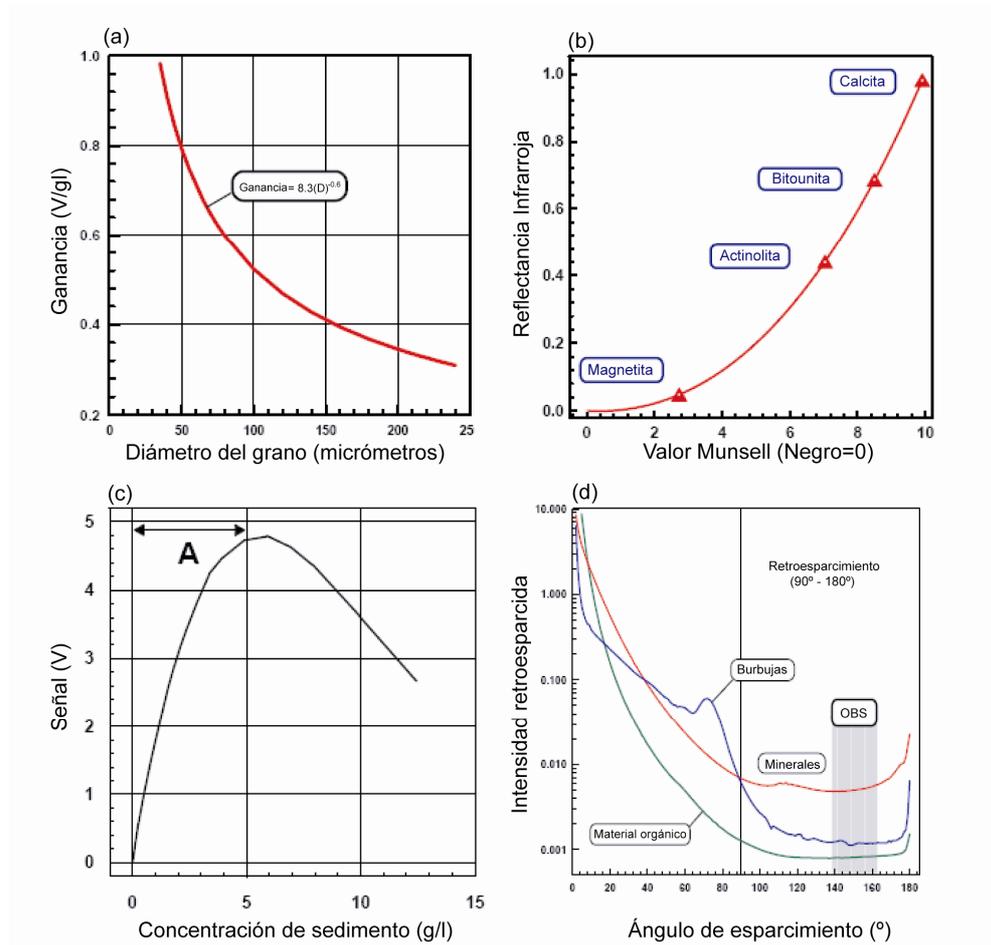


Figura 3.3. **a)** Relación entre la ganancia del instrumento ($V/g/l$) y el tamaño de partícula en micrómetros. **b)** Diferentes tipos de minerales, representados en la escala Munsell de clasificación del color, y su índice de reflectancia en el infrarrojo. **c)** Relación entre la concentración de sedimento y la señal registrada por el equipo, en donde A señala el rango óptimo de medición **d)** Intensidad de la señal esparcida por diferentes tipos de partículas en suspensión (Tomadas y modificadas de D & A Instruments, 2004)

3.2. INSTRUMENTO ACÚSTICO: Acoustic Current Doppler Profiler

Los instrumentos acústicos han sido ampliamente utilizados para medir velocidad de la corriente. Recientemente ha crecido el interés por usar esta técnica en la estimación de concentración de sólidos en suspensión, teniendo en cuenta que se pueden obtener series de datos con alta resolución espacial y temporal, sin interferir directamente con el flujo de sedimentos. El desarrollo de instrumentos comerciales, como el *Acoustic Doppler Current Profiler* – ADCP ha incrementado las posibilidades de utilizar esta técnica de manera sistemática y eficiente (Gartner, 2002).

3.2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), es un dispositivo acústico que permite registrar la velocidad y dirección del agua a diferentes profundidades, en otras palabras, realiza perfiles de corriente. Estas mediciones las hace a través de tres transductores, que pueden estar dirigidos hacia el fondo o la superficie (pero siempre sumergidos), los cuales emiten pulsos de sonido con un valor de frecuencia fijo (Figura 3.4a). Las partículas presentes en el agua, como los sedimentos, hacen que las ondas acústicas producidas por el ADCP se reflejen. Estos sedimentos se mueven con una velocidad determinada, dependiente de la fuerza de la corriente que los arrastra. De acuerdo con el efecto Doppler, la frecuencia del eco que retorna al dispositivo difiere de la que es emitida; a partir de esta variación es posible calcular la velocidad con que se mueven las partículas en suspensión, es decir, la velocidad del agua. El efecto Doppler se representa matemáticamente con la siguiente relación:

$$F_D = 2F_s \left(\frac{v}{c} \right) \quad (3.1)$$

en donde,

v y c , son la velocidad relativa entre la fuente y el receptor, y la velocidad del sonido en el medio, respectivamente. Ambas en m/s.

F_s , F_D , son la frecuencia de la fuente, y el cambio en frecuencia registrado por el ADCP, medidas en kHz.

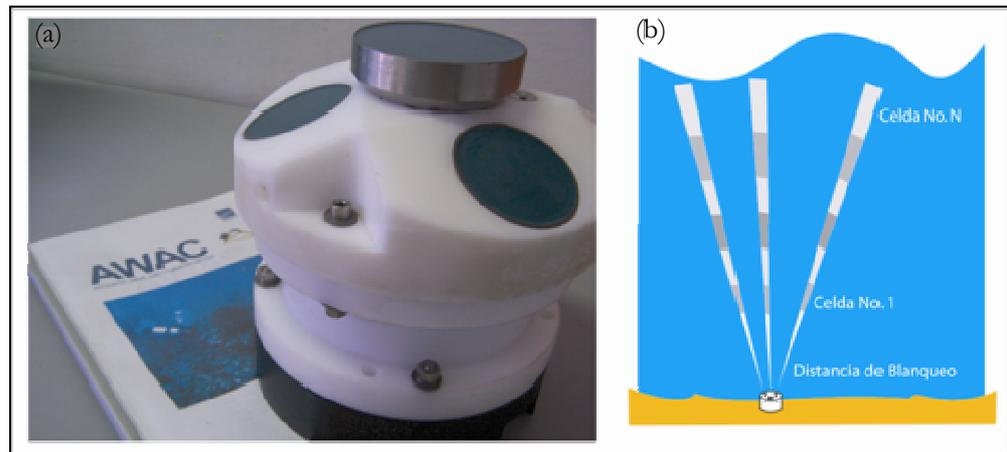


Figura 3.4. a). *Acoustic Doppler Current Profiler- ADCP.* Cada uno de los óvalos verdes en la parte superior del equipo es un transductor, en este caso una fuente de sonido. **b).** Esquema de medición del ADCP. El rango del haz acústico es dividido en celdas, por cada una se tiene un valor de velocidad y otro de amplitud (Tomada y modificada de Nortek, 2004)

Para realizar un perfil de corriente la columna de agua se divide en celdas que corresponden a la distancia que el pulso de sonido recorre en un tiempo (Figura 3.4b). Para cada celda habrá un valor de velocidad, además de una medición de amplitud de la señal dada en *counts*, que constituye una unidad interna del equipo (1 *count* equivale a ~ 0.45 dB), éste valor se utiliza para estimar la calidad de los datos de velocidad. Se ha encontrado que mediante una serie de correcciones, la señal de amplitud se hace proporcional a la concentración de partículas en suspensión (Holdaway, 1999; Lorhman, 2001; Creed et al, 2001). Sin embargo, el valor de amplitud de la señal censada por el equipo no es directamente comparable con valores de concentración. A medida que el sonido se propaga por el agua se atenúa, así la amplitud también se ve fuertemente determinada por la profundidad. Por tanto, antes de establecer una

equivalencia entre amplitud y concentración la señal debe ser corregida teniendo en cuenta las pérdidas por absorción.

3.2.2. CORRECCIÓN SEÑAL ACÚSTICA

El método para estimar CSS a partir de la intensidad de la señal acústica retroesparcida (*Acoustical Backscatter Intensity*) se basa en la ecuación para el sonido esparcido por pequeñas partículas (Ecuación 3.2), conocida también como la ecuación sonar (J.R. Urick, 1975). En su forma simplificada ésta ecuación relaciona el nivel de intensidad (NI), registrado después de la interacción entre el sonido y la partícula, con algunas propiedades del receptor (R), como la función de forma, la rigidez y la compresibilidad. Se tienen en cuenta además, algunas características de la fuente (NIF), como la frecuencia y la intensidad, así mismo, considera el nivel de ruido (NR), y las diferentes pérdidas debido a la propagación (PP), asociadas principalmente a la absorción por el agua (parámetro que depende a su vez de la frecuencia de muestreo, la salinidad, temperatura y presión) y la atenuación del sonido por los sedimentos (Gartner, 2002).

$$NI = NIF - PP - (NR - R) \quad (3.2)$$

3.2.2.1. Monitoreo de sedimentos con el ADCP

Utilizando una aproximación de la ecuación sonar es posible convertir los registros de *counts*, realizados por el ADCP, en unidades directamente comparables con CSS. La ecuación de conversión es de la forma:

$$EL = \underset{(i)}{counts} \times \underset{(ii)}{0.43} + \underset{(iii)}{20} \log_{10} \underset{(iv)}{R} + \underset{(iii)}{2} \alpha_w R + \underset{(iv)}{20} \int \alpha_p dr \quad (3.3)$$

Esta ecuación consta de cuatro términos, discriminados de la siguiente manera: (i) el valor de *counts* es multiplicado por un factor de escala de 0.43, que puede variar entre 0.40 a 0.47. (ii) El

segundo término se relaciona con la dispersión del haz acústico y su forma cónica, es una corrección geométrica que depende principalmente de R , que es el rango a lo largo del haz acústico, medido en metros. (iii) La tercera pérdida se debe a la atenuación del sonido por el agua, representado por el coeficiente de absorción, α_w , dB/m . (iv) El último término hace referencia a la pérdida de intensidad de la señal debido a las partículas en suspensión, ésta atenuación se representa con el coeficiente de absorción α_p , dado en dB/m .

3.2.2.2. Corrección geométrica

A medida que las ondas acústica se propagan en el agua experimentan un tipo de divergencia esférica, que reduce su intensidad a una tasa inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que ha recorrido la onda (Kinsler y Frey, 1961).

$$I = \frac{I_0}{r^2} \quad (3.4)$$

Donde, I_0 es la intensidad de la onda emitida, medida en w/m^2 . I es la intensidad de la onda a una distancia r , en metros, de la fuente emisora. Teniendo en cuenta la relación anterior, la atenuación se puede representar en términos de decibeles con la expresión:

$$n_r = -20 \log r \quad (3.5)$$

3.2.2.3. Atenuación del sonido por el agua

Como se mencionó anteriormente la atenuación del sonido por el agua depende en gran medida del coeficiente α_w . Este factor es función de la frecuencia del sonido, la salinidad y la presión (profundidad del agua). Se puede calcular utilizando el modelo de François and Garrison (1982) (Scientific Fishery System, 1998).

$$\alpha_w = \frac{A_1 F_1 f^2}{F_1 + f^2} + \frac{A_2 P_1 F_2 f^2}{F_2 + f^2} + A_3 P_2 f^2, \quad (3.6)$$

donde,

$$A_1 = \frac{8.86}{c} 10^{0.78 pH - 5},$$

$$A_2 = \frac{21.44S(1 + 0.0025T)}{c},$$

$$A_3 = (4.937 \times 10^{-4}) - 2.59 \times 10^{-5} T - 9.11 \times 10^{-7} T^2 - 1.5 \times 10^{-8} T^3,$$

$$F_1 = 2.8 \left(\frac{S}{35} \right)^{0.5} \times 10^{4 - \frac{1245}{\varphi(T)}},$$

$$F_2 = \frac{8.17 \times 10^8 \frac{1990}{\varphi(T)}}{1 + 0.0018(S - 35)},$$

$$P_1 = 1 - 1.37d + 6.2 \times 10^{-9} d^2,$$

$$P_2 = (1 - 3.93 \times 10^{-4} d) + 4.9 \times 10^{-10} d^2$$

T , es la temperatura del agua en °C. S , es la salinidad en PSU. d , la profundidad. Además, éste grupo de ecuaciones muestran que el coeficiente de absorción también está determinado por la velocidad a la cual se propaga el sonido a través del agua, c ; valor que depende a su vez de la temperatura, la salinidad y la presión, que se relaciona con el aumento de la profundidad, de la siguiente manera:

$$c = 1410 + 421t - 3.7t^2 + 110S + 0.18d \quad (3.7)$$

Los cambios de salinidad son apreciables en los deltas y estuarios, considerando la interacción entre los aportes de agua dulce y agua salada (Kinsler y Frey, 1961). A partir de las mediciones corrientes que realiza el ADCP se puede calcular la dirección del flujo, e inferir los cambios de salinidad en un perfil vertical, sin embargo se acostumbra sumergir junto al ADCP un

dispositivo que mida los cambios en salinidad, y a partir de éstos, corregir la medición de velocidad realizada por el ADCP (Alvarez y Jones, 2001; Creed et al, 2001).

Una vez determinado el coeficiente de absorción se establece la ecuación absorción de sonido por el agua, que es de la forma: (Kinsler y Frey, 1961):

$$I = I_o 10^{-\alpha_w r / 10} \quad (3.8)$$

Donde, I_o , es la intensidad de la onda emitida, medida en w/m^2 I , es la intensidad de la onda a una distancia r , en metros, de la fuente emisora. Combinando las ecuaciones 3.4 y 3.8 se obtiene la expresión para la atenuación del sonido, debido a la divergencia esférica, corrección geométrica, y a la absorción por el agua:

$$I = \frac{I_o x 10^{\alpha_w / 10}}{r^2} \quad (3.9)$$

La expresión para las pérdidas en decibeles es de la forma:

$$n = -20 \log r - \alpha r \quad (3.10)$$

La pérdida asociadas a la absorción de sonido por el agua ocurre en dos ocasiones, la primera vez cuando el sonido va hacia las partículas en suspensión, y la segunda cuando el sonido es reflejado por ellas y regresa a la fuente. De ahí que en la ecuación 3.3 el término (iii) esté operado por un factor de 2 (Lohrman, 2001).

3.2.2.4. Atenuación por las partículas en suspensión

Las partículas en suspensión pueden generar pérdidas en la intensidad de la onda debido, principalmente, a fenómenos físicos como el esparcimiento, la absorción (Thorne y Hanes, 2002) y la difracción (USGS, 2006). En la ecuación 3.3 éste valor (término iv) se encuentra dentro de una integral, teniendo en cuenta que el tamaño de las partículas no es uniforme a lo largo de la columna de agua (Lorhman, 2001).

$$\alpha_p = \frac{1}{r} \int_0^r \xi(r) M(r) dr$$

$$\xi = \frac{3}{4 \langle a_s \rangle \rho_s} \langle \chi \rangle$$
(3.11)

donde: r , es la distancia de la fuente de sonido a los sedimentos. ξ , se conoce como la constante de atenuación del sedimento, que depende del diámetro a_s , y la densidad del sedimento ρ_s , y la “sección transversal de reflexión normalizada” (*normalised total scattering cross-section*) $\langle \chi \rangle$ del sedimento que interactúa de manera directa con la onda acústica. Se han realizado algunos experimentos para calcular este último valor en partículas compuestas principalmente por cuarzo (Thorne y Hanes, 2002). Además, se asume que el sonido interceptado por las partículas en suspensión es re-emitido uniformemente en todas direcciones (Kinsler y Frey, 1961).

3.2.2.5. Sensibilidad del instrumento

Además, de las ya enumeradas serie de atenuaciones que sufre la señal acústica generada por el ADCP, cabe resaltar que este tipo de dispositivo responde de acuerdo al tamaño de partícula que se esta censando. Es decir va a mostrar predilección, o mayor “sensibilidad”, por un tamaño definido de partícula; entendiendo sensibilidad como la cantidad de amplitud reflejada. Esto ocurre cuando el diámetro de la partícula es igual a la longitud de onda acústica:

$$k \times a_s = 1$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$
(3.12)

Donde k es el número de onda; a_s diámetro de la partícula, en micrómetros; f longitud de onda del sonido. Tomando la frecuencia de operación del ADCP, 600 kHz, y aplicando la ecuación

3.12, se infiere que éste dispositivo será más sensible a las partículas con un tamaño cercano a los 400 μm , valor que se encuentra por encima del tamaño promedio presente en la bahía de Tumaco.

El valor obtenido después de aplicar la ecuación de conversión, EL , se conoce como nivel de eco (*Echo Level*). Este valor, independiente de la profundidad, se compara con medidas de CSS tomadas a partir de muestras de agua extraídas en un momento y lugar tal que permita relacionar esos datos con los registros del ADCP, de esta forma es posible construir una curva de ajuste que relaciona las dos cantidades. Según reportes (Alvarez y Jones, 2001. Gartner, 2002, Dinehart y Burau, 2005, Aardom, 2005) ésta relación es de tipo lineal dentro de un plano semi-logarítmico:

$$\log(CSS_{medido}) = A + B \times EL \quad (3.13)$$

donde: CSS , es el valor de concentración medido a partir de las muestras de agua. EL es el valor de nivel de eco. A y B representan el intercepto y la pendiente de la curva, respectivamente. Aunque autores como Kostaschuck et al (2005) han reportado mejores curvas de ajuste con relaciones lineales.

3.2.2.6. Respuesta del ADCP

El ADCP permite monitorear la variación espacial y temporal de la velocidad de las corrientes, y, como recientemente se ha demostrado, es posible a través de su registro de amplitud visualizar la variación de la concentración de sedimentos en suspensión, haciendo una estimación cuantitativa de éste valor. La variación espacial se establece a partir de la división de la columna de agua en diferentes celdas, mientras que la variación temporal se determina a medida que se emite cada pulso de sonido. Es de esperar entonces que los archivos de datos que el ADCP entrega estén discriminados teniendo en cuenta los registros realizados a diferentes profundidades y en tiempos distintos.

Una vez que el equipo, estando sumergido, ha realizado las mediciones correspondientes, a una tasa establecida por el usuario, los datos son descargados al computador por medio del puerto serial RS-232. Ya que el ADCP cuenta con diferentes sensores, realiza distinto tipo de mediciones, algunas de ellas, como ya se ha mencionado, son la velocidad de la corriente y amplitud del eco reflejado por los sedimentos en suspensión (*counts*); otros parámetros que registran son: la velocidad de propagación del sonido en el agua, la temperatura y presión, todo esto en el punto en el cual se encuentra fijo. El equipo además cuenta con sensores que determinan la inclinación de los transductores, a partir de los cuales se establece si el conjunto de datos es válido para su procesamiento y análisis.

El registro de *counts* es realizado de manera simultánea por tres transductores diferentes; con los que se obtienen tres archivos de datos. Estos archivos consisten en una matriz, en donde las columnas corresponden a cada una de las celdas en las que se ha dividido la columna de agua, y las filas se relacionan con las diferentes mediciones hechas por cada uno de los pulsos de sonidos. El primer término corresponde al primer dato en la primera celda, el segundo dato, siguiente columna, corresponde al primer dato de la segunda celda, ésta secuencia se repite hasta alcanzar la última columna, que corresponde al primer dato de la última celda. El cambio de fila indica un nuevo pulso de sonido. No necesariamente la última celda corresponde a la mayor profundidad. La posición de las celdas respecto del fondo depende de hacia dónde estén dirigidos los transductores, es decir, si estos están dirigidos hacia la superficie, la última celda corresponde a la celda más cercana a la superficie, la menos profunda; se presenta el caso contrario si los transductores se dirigen hacia el fondo.

A los diferentes valores de amplitud, *counts*, dentro de las matrices de datos se les aplica la ecuación de conversión 3.3. El componente que registra la amplitud de la señal en el ADCP (Nortek AS) produce una salida proporcional al logaritmo de la intensidad del eco; el rango dinámico de ésta señal es aproximadamente de 90 *dB* y es lineal, con una precisión de 1-2 *dB*, dentro de un rango de 70 *dB*. Dentro de éste rango, el factor de escala es de 0.45 *counts/dB*,

pero puede variar entre 0.40 y 0.47. Se ha comprobado que la región lineal corresponde a valores de concentraciones de sedimento entre 0-10000 *mg/l*. (Lohrmann, 2001).

Teniendo en cuenta el volumen de información, se desarrolló una rutina en MatLab® que recorre las columnas de la matriz, es decir, se mueve entre celdas, y corrige los términos en cada una de ellas, teniendo en cuenta su profundidad, variable que determina el grado de atenuación que tiene la señal, como producto principalmente de la dispersión del haz acústico y la absorción de energía por el agua. De esta forma, las matrices con valores de *counts* pasan a ser matrices con datos del nivel de eco, EL.

CAPÍTULO 4

MEDIADAS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CALIBRACIÓN OBS – 3A

Para establecer una relación entre la señal registrada por el sensor y la concentración de sedimentos, es necesario calibrar al OBS usando sedimento recolectado en la zona de estudio (Butt et al, 2002), debido a que las condiciones como el tamaño promedio, la composición y concentración media del sedimento influyen considerablemente en la respuesta del equipo. De acuerdo con el registro histórico de la estación Pipiguay realizado por el IDEAM (1980-2000) y una serie de mediciones puntuales desarrolladas por el CCCP en el 2005, se determinó que el rango de CSS esperado en el delta de río Mira y la bahía de Tumaco está por debajo de los 2000 mg/l (2 gr/l), valor que se encuentra dentro del rango confiable de medición del OBS (Ver figura 3.3c, Capítulo 3). En cuanto a las características físicas de los sedimentos, estudios previos reflejan que los sedimentos presentes en la bahía de Tumaco son principalmente de origen litoclástico, con un D_{50} que varía entre 0.3 mm y 0.1 mm, es decir son partículas con un tamaño que oscila entre los 100 y 300 micrómetros; es de anotar que la ganancia del OBS se ve notoriamente disminuida dentro de éste rango (ver figura 3.3a, Capítulo 3).

4.1.1. Tamizado de las muestras

Los sedimentos utilizados en la calibración del OBS corresponden a muestras en suspensión y de fondo obtenidas con trampas de sedimento y cono inof, respectivamente, durante tres muestreos estacionales efectuados en el 2005. Antes de pasar al tamizador, el sedimento fue secado en un horno a 110°C durante 24 horas. Se retiró del material seco todos los desperdicios biológicos (i.e como conchas, ramas o madera), además con la ayuda de un

mortero se destruyeron algunos grumos de sedimento. Este material se paso a través de un juego de 10 tamices; con lo que se consiguió muestras de sedimento discriminadas por tamaños, entre 0.069 y 2.5 mm. Después pesar el contenido de cada tamiz se comprobó que la mayor cantidad de sedimento permaneció dentro los tamices número 50 (~25.11%) y 140 (~29.64%) (Figura 4.1), lo que implica partículas con un tamaño medio de 0.1 y 0.3 mm respectivamente, correspondiente a arenas finas según el esquema de Udden-Wentworth (Ver figura 2.1, Capítulo 2).

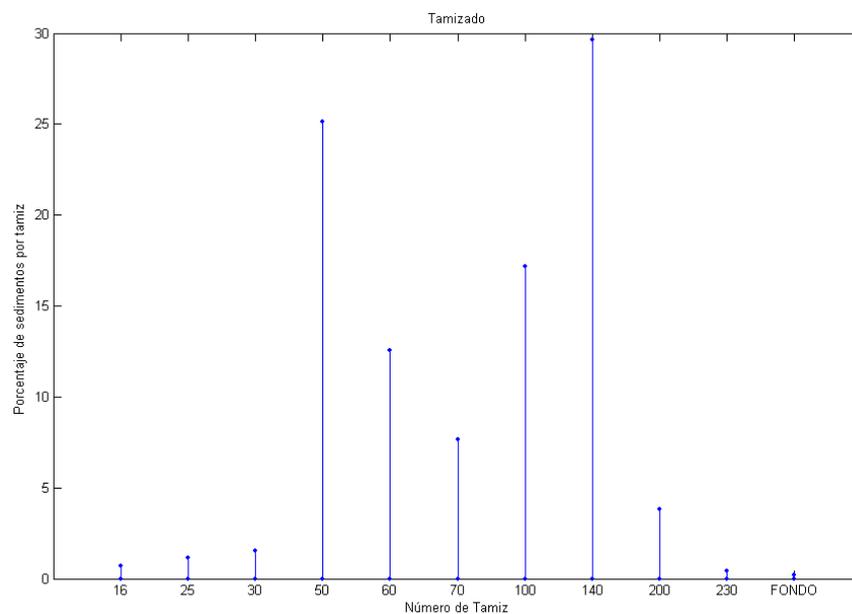


Figura 4.1. Cantidad de sedimento por tamiz. Los tamices 50 y 140, tamaño de grano de 0.1 mm y 0.3 mm respectivamente, representan el tamaño característico del sedimento presente en el delta del río Mira; su tamaño lo ubica dentro del grupo de la arenas finas.

Estos datos representan el tamaño promedio de sedimento encontrado en la bahía de Tumaco, lo que concuerda con las mediciones realizadas por el CCCP en años anteriores. A partir de estos valores de diámetro medio se prepararon las muestras de sedimento utilizadas en la calibración.

4.1.2. Procedimiento de calibración

Una vez establecidos los rangos de calibración, dados por los registros históricos de CSS dentro de la bahía de Tumaco (valor máximo de 2000 mg/l), así como el tamaño representativo de la muestra de sedimento (0.1 – 0.3), que sirve como muestra patrón, se da inicio al procedimiento de calibración del equipo. El OBS se conecta al computador por medio del puerto serial (RS-232). La configuración de los sensores, el modo de muestreo, y en este caso, el procedimiento de calibración se hace por medio del software *Optical Backscatter* para *Windows* (OFW) propio del OBS.

El primer paso consistió en definir el cero del equipo. Para tal fin se utilizó un tanque plástico negro, con unas dimensiones aproximadas de 50x35x40 *cm*, al que se le adicionó una cantidad de agua destilada suficiente como para cubrir completamente al sensor OBS. Una vez sumergido el OBS (y evitando la presencia de cualquier elemento extraño dentro del tanque, incluso burbujas) se registra el valor de concentración que se va a medir, en miligramos por litro (mg/l), en seguida se da la orden para que inicie la medición, así el OBS relaciona un valor de concentración a un “número de registros” (*counts*). Cabe resaltar que todo el proceso de calibración se desarrolló bajo luz fluorescente, evitando además la influencia de fuentes externas de luz que pudieran alterar la medición de los fotodiodos.

Definido el cero del equipo, se realizan mediciones con diferentes valores de concentración de sedimentos para completar la curva de calibración. De acuerdo con los valores máximos de concentración que se han reportado en la bahía de Tumaco, se tomó como rango de calibración desde 0 mg/l hasta 3000 mg/l . Este rango se dividió en cinco incrementos de concentración (0, 500, 1000, 1500, 2500 y 3000 mg/l). Dentro del proceso de calibración del OBS-3A es importante garantizar que el tamaño de las partículas en suspensión permanezca constante, de igual forma, se debe procurar que estén suspendidas y distribuidas de la manera más homogénea posible.

El montaje de calibración construido se compone principalmente de un tanque plástico, con aproximadamente 25 *cm* de diámetro, con agua destilada (5 litros), en donde los sedimentos se mantienen en suspensión debido a la rotación de una hélice ajustada a un taladro de mano (D&A Instruments, 2004) (Figura 4.2). Éste sistema garantiza una mezcla homogénea de sedimento no cohesivo a concentraciones menores de 30 *kg/l* (30×10^6 *mg/l*) Para concentraciones de hasta 100 *kg/l* (100×10^6 *mg/l*) se han utilizado; en algunas ocasiones, tanques de recirculación, y para concentraciones mayores (hasta 200×10^6 *mg/l*), se ha preferido el uso de glicerol en lugar de agua como fluido, teniendo en cuenta su mayor viscosidad, lo que garantiza un tiempo de sedimentación menor, aunque implica un ajuste extra en la curva de calibración debido a las diferentes propiedades ópticas del glicerol y el agua destilada (Butt et al, 2002). Se debe tener cuidado al utilizar cualquiera de los métodos antes mencionados ya que una gran turbulencia contribuye a que las dimensiones de las partículas cambien de manera constante (Fettweis et al, 2006), y una poca turbulencia hace que las partículas se precipiten. Además, los sedimentos tienden a permanecer en suspensión formando “grumos” (*bursts*), lo que constituye un problema extra cuando se necesitan muestras de sedimentos homogéneas.

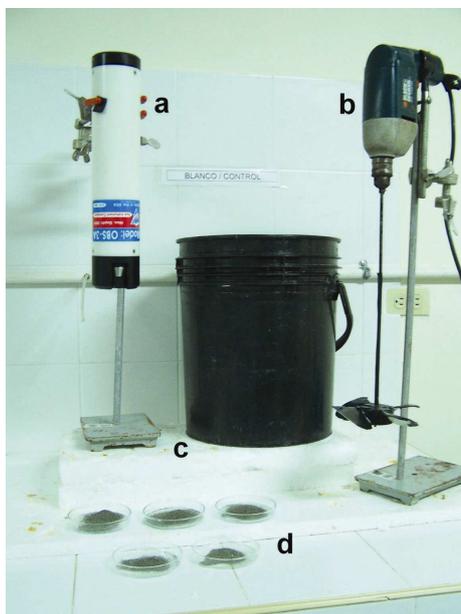


Figura 4.2. Montaje de calibración del OBS-3A. **a.** OBS-3A. **b.** Sistema hélice-taladro. **c.** Tanque de calibración. **d.** Incrementos de concentración

Se obtuvo una relación de calibración polinomial de tercer orden con alto índice de correlación ($R^2=0.98$) (Figura 4.3). Para asegurar que la calibración realizada sea válida se debe comprobar que la magnitud promedio de los residuos (diferencia entre valores observados y predichos) sea menor al 1% del rango de medición (D&A Instruments, 2004) (Tabla 4.1). En este caso se obtuvo un valor promedio de 0 (cero) mg/l ; valor que esta en concordancia con el índice de correlación encontrado para la relación de calibración.

X(counts)	Y(mg/l)	Residuo(mg/l)
32 958.09	0.01	0.06
34 117.13	500	-2.81
34 361.15	1000	6.63
34 528.96	1500	-2.53
34 810.24	2500	-245.88
34 812.01	3000	244.53
		0

Tabla 4.1. Tabla de datos de la calibración del OBS-3A. X, dado en *counts*, es el conteo interno del equipo. Y, dado en *mg/l*, son cada uno de los incrementos de concentración aplicados. Por último, el residuo es la diferencia entre los valores esperados y predichos.

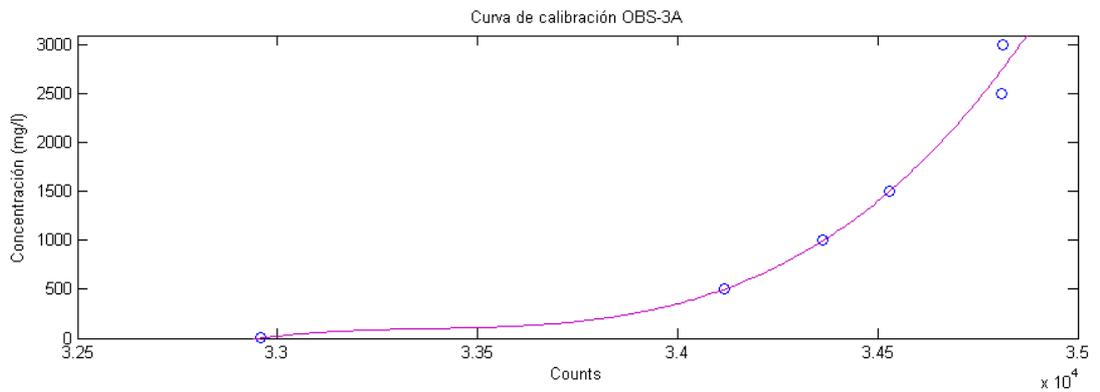


Figura 4.3. Curva de calibración. El OBS realiza un ajuste estadístico de los datos utilizando una función polinomial de tercer orden.

$$y = 2 \times 10^{-6} x^3 - 0.2 x^2 + 6816 x + 8 \times 10^7, \text{ ecuación de calibración.}$$

4.2. MEDICIONES DE CONCENTRACIÓN CON EL OBS – 3A

Dos equipos OBS -3A (Referencias OBS-204 y OBS-207) se calibraron para realizar mediciones de concentración. Como patrón de calibración se utilizó sedimento, previamente secado y tamizado, de la zona de estudio. De acuerdo con el proceso de tamizado, se determinó que el diámetro de los sedimentos presentes en la bahía de Tumaco oscilan entre 0.1 mm y 0.3 mm. Por tal razón, el OBS-204 fue calibrado con sedimento 0.2 mm de diámetro (valor medio), mientras que el OBS-207 se calibró con sedimento de 0.3 mm. La diferencia entre los patrones de calibración se realizó con el fin de cuantificar y cualificar su influencia en la respuesta del equipo, en cuanto a las mediciones de concentración se refiere.

El muestreo con ambos equipos se realizó de manera simultánea dentro de la bahía de Tumaco. Los instrumentos se programaron para realizar mediciones de CSS, turbidez y nivel del mar, a intervalos de 10 minutos durante aproximadamente 72 horas, con lo que se obtuvieron alrededor de 6900 datos. Con las 72 horas de muestreo se buscó registrar información en diferentes estados mareales, para estimar el comportamiento dinámico de los sedimentos. Se utilizó una prueba *t* pareada para establecer las comparaciones pertinentes entre los registros de cada dispositivo. El valor *p* obtenido al realizar la prueba revela el nivel de significancia en relación a ésta. Cuanto menor sea éste valor servirá como criterio para rechazar la relación entre los datos observados.

Los sensores OBS son calibrados por el fabricante utilizando formazina, e incluyen un certificado de calibración expresado en unidades nefelométricas de turbidez –NTU (D&A Instruemts, 2004). A medida que aumenta el volumen de formazina aumenta la turbidez de la solución. Sin embargo una prueba *t* pareada mostró que existen diferencias entre las mediciones de turbidez obtenidas por cada uno de los equipos ($p < 0.1$), a pesar de lo cual los resultados presentan la misma tendencia (Fig. 4.4a). Con el dispositivo OBS-204 se registró un

valor máximo de 18.3 NTU, mientras que con el OBS-207 se determinó un máximo de 19.2 NTU.

Las mediciones de CSS arrojan diferencias aún más significativas ($p \ll 0.1$). Los registros de CSS del OBS-207 presentan valores entre 0 y 61.8 mg/l , mientras que el OBS-204 presenta datos entre 0 y 412.4 mg/l (Fig 4.4b). Esta notoria diferencia radica, principalmente, en que la cantidad de radiación retroesparcida es inversamente proporcional al diámetro de la partícula (D&A Instrumets, 2004), por lo tanto la relación entre la radiación registrada y la CSS varía. En este caso, una variación de 0.1 mm en el diámetro del sedimento utilizado en la calibración conduce a diferencias de $\sim 37\%$ en los valores de CSS registrados. Este análisis muestra la forma en la que el diámetro del sedimento con el que se calibra el equipo determina de manera significativa su respuesta.

Es posible establecer una relación entre los picos de CSS y turbidez con los cambios en el nivel del mar (figura 4.4c). En periodos de bajamar se presentan las menores concentraciones de sedimento, así como los registros más bajos de turbidez; por el contrario, cuando el nivel del mar aumenta, se dan los mayores incrementos, teniendo en cuenta que en estos periodos es los que mayor cantidad de agua llega a la zona costera. Se puede inferir además, que a medida que aumenta la amplitud de los cambios en el nivel del mar, los picos de concentración y turbidez se hacen mayores. El aumento en la amplitud en la marea está relacionado con un mayor volumen de agua que llega a la bahía lo que redundaría en un aumento en la cantidad de sedimentos transportados.

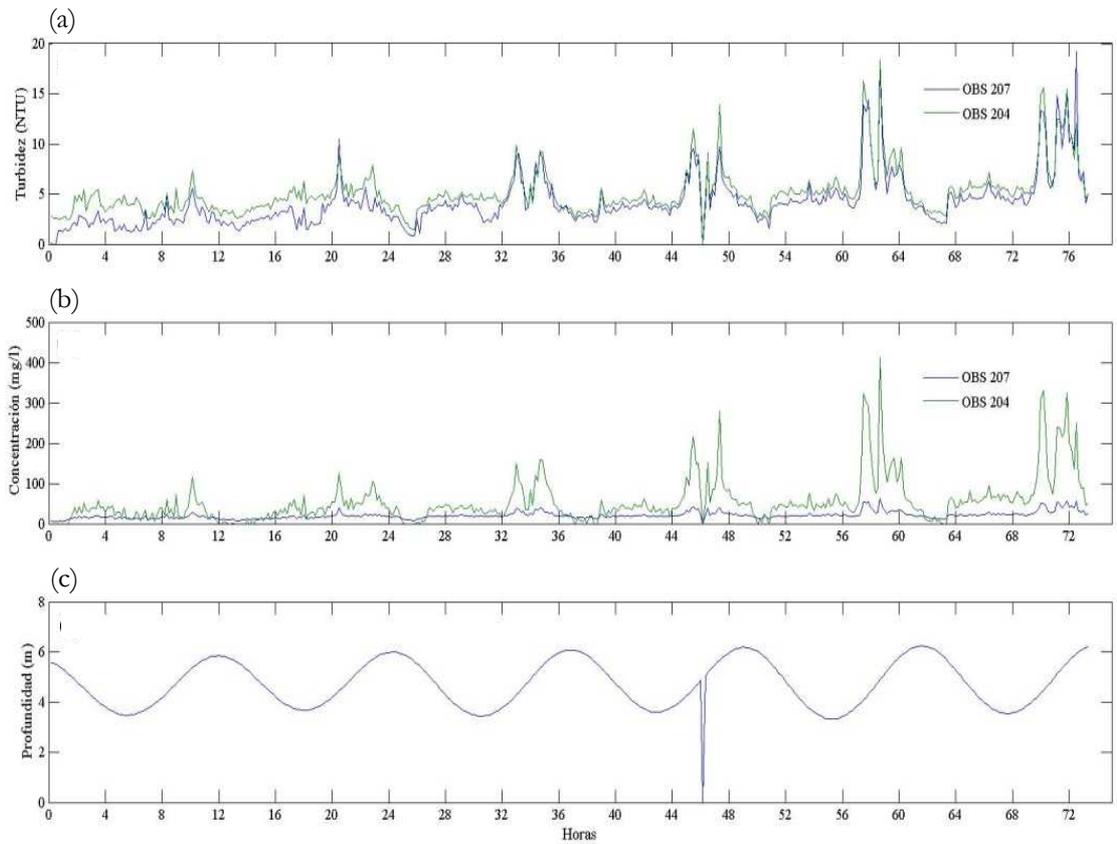


Figura 4.4. a) Mediciones de turbidez (NTU) con el OBS 207 y el OBS 204. **b)** Mediciones del CSS (mg/l) con el OBS 207, calibrado con sedimentos de diámetro de 0.3 mm, y el OBS 204, calibrado con sedimentos de diámetro de 0.1 mm. **c)** nivel del mar (m) durante el muestreo, registrado a partir de mediciones de profundidad realizadas con el OBS 207.

4.2.1. Relación entre la turbidez y la CSS

La turbidez es una propiedad óptica de la materia, mientras que la concentración se define en términos de masa y volumen. Esta situación hace que una comparación de este tipo sólo sea conveniente cuando se cumplan las siguientes condiciones: i. Las medidas hayan sido tomadas con el mismo turbidímetro, ii. Se debe garantizar que el turbidímetro éste calibrado con un estándar de turbidez, y con muestras de materia suspendida de la zona de monitoreo. iii. El tamaño y composición de las partículas no cambie durante el muestreo (D&A Instruments. 2004).

Utilizando el OBS-207 (calibrado con partículas de 0.3 *mm*) se registraron datos de CSS y Turbidez dentro de la bahía de Tumaco, así como en inmediaciones del delta del río Mira. Los registros de CSS y turbidez, obtenidos en cada una de las zonas de muestreo, se compararon entre sí. Teniendo en cuenta los dos diferentes lugares de registro se tienen relaciones ente CSS y turbidez dentro de rangos distintos; estos dos grupos de datos fueron sintetizados dentro de uno sólo para visualizar la relación entre las variables en un intervalo mayor. (Figura 4.5)

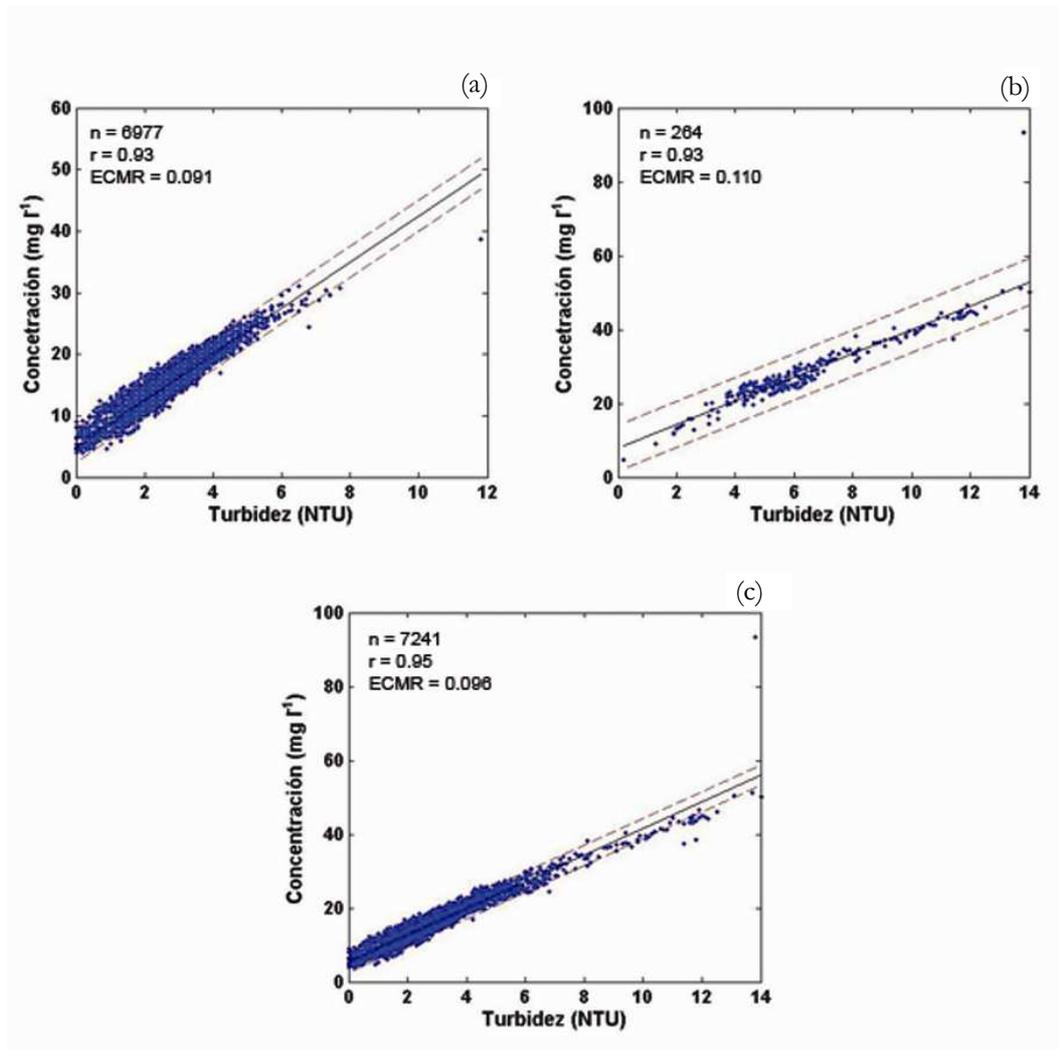


Figura 4.5. Comparación entre los registros de turbidez (*NTU*, unidades nefelométricas de turbidez) y *CSS* (*mg/l*) con el OBS-207. **a).** Tomados dentro de la bahía de Tumaco. **b).** Registrados en inmediaciones del delta del río Mira. **c).** Combinación entre los dos conjuntos de datos. En las gráficas: *n*, representa el número de datos registrados; *r*, el índice de correlación; y *ECMR*, el error cuadrático medio.

A partir de la figura 4.5 se observa una relación lineal entre la turbidez y la *CSS*, con altos índices de correlación (0.93, 0.93 y 0.95). La figura 4.5a muestra los registros obtenidos dentro

de la bahía de Tumaco, en donde la influencia fluvial es muy poca, y el sedimento es transportado por el mar, de ahí que se obtengan un menor rango de valores (4 y 38.6 mg/l ; 1 y 11.8 NTU), en comparación con la figura 5b que representa los datos obtenidos en el delta del río Mira (4.8 y 93.5 mg/l ; 0.2 y 14 NTU), en donde las descargas fluviales son determinantes. Las relaciones matemáticas obtenidas son:

$$\begin{aligned}
 CSS_a &= 3.75 \times NTU + 5.05 \quad (r^2 = 0.871) \\
 CSS_b &= 3.21 \times NTU + 7.97 \quad (r^2 = 0.875) \\
 CSS_c &= 3.62 \times NTU + 5.36 \quad (r^2 = 0.91)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

De acuerdo con Guillén et al (2007) una relación lineal entre la turbidez y la CSS indica que el tamaño promedio de las partículas en suspensión se mantiene relativamente constante durante el tiempo de muestreo. Este mismo autor sostiene que la pendiente de la recta de calibración depende en gran medida del tamaño de los sedimentos. Las relaciones encontradas muestran pendientes con valores cercanos entre sí (3.75, 3.21 y 3.62), lo que sugiere una constante en cuanto al diámetro de los sedimentos encontrados en al bahía de Tumaco. Esto hace que las curvas de calibración entre turbidez y concentración sólo tengan validez local, y sólo puedan ser empleadas para propósitos descriptivos o semi-cuantitativos (Guillén et al, 2007). La relación lineal entre la turbidez y la CSS encontrada es un indicador favorable para el uso del OBS en la medición del CSS, teniendo en cuenta que la respuesta de esta clase de equipos esta determinada por el cambio o estabilidad de algunas de las características de los sedimentos (e.g, tamaño, forma, composición).

4.3. ESTIMACIONES DE CONCENTRACIÓN ADCP

Una vez establecidas las correcciones pertinentes que se le deben realizar a la señal entregada por el ADCP (Ver Capítulo 3 para una descripción detallada al respecto), se realizó una rutina en MatLab® que opera los términos de las matrices de *counts* (amplitud de la señal) y los convierte en matrices con valores de nivel de eco, valor comparable con la concentración de sedimentos en suspensión. Las correcciones obedecen a pérdidas en la intensidad de la señal, que se deben principalmente a la absorción de sonido por el agua y las partículas en suspensión, así como a un tipo de corrección geométrica. La absorción debido al agua se calculó a partir del algoritmo de François y Garrison (Capítulo 3, ecuación 3.6), la corrección geométrica se determinó a partir de una ficha técnica publicada por Nortek en el año 2001. En un estudio realizado por el USGS en colaboración con el Departamento de Conservación Medioambiental del Estado de Nueva York en el año 2006 en el que se utilizó un ADCP de 614 kHz (RD Instruments), dentro del río Hudson en Nueva York, se determinó que la influencia de las partículas es despreciable para dicha frecuencia (Figura 4.6). Extrapolando éste resultado para una frecuencia de 600 kHz y sedimento de aproximadamente 300 micrómetros (0.3 mm), es posible considerar poco significativa la influencia de los sedimentos en la atenuación del sonido.

La rutina desarrollada se aplicó a una serie de datos registrados en campañas realizadas en abril y septiembre del año 2006 y abril de 2007, con el ADCP en modo perfilador de corriente, en el delta del río Mira, por parte del grupo de Morfodinámica del CCCP. El ADCP permaneció fijo en el fondo con los transductores dirigidos a la superficie. Es de resaltar que los datos son editados teniendo en cuenta la altura de la marea, con el fin de reconstruir la información dentro de rangos de profundidad reales, además, se eliminan los términos de la última celda ya que estos valores de *counts* están influenciados por la intensidad de señal que se refleja de la superficie, interface entre agua y aire.

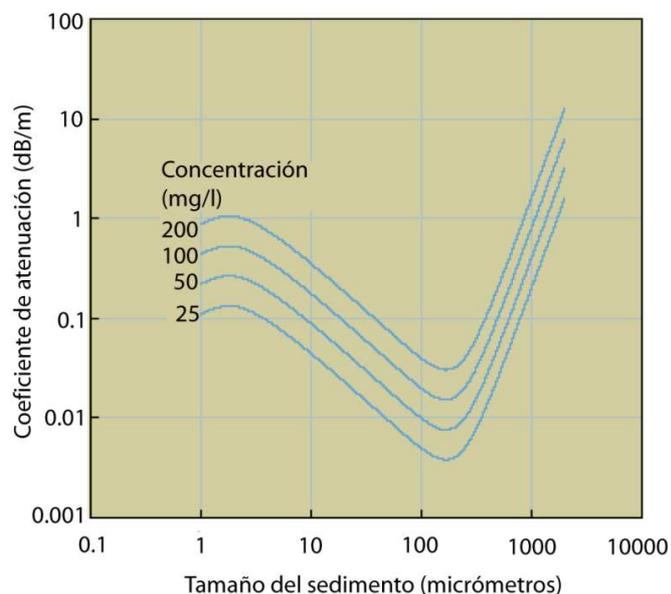


Figura 4.6. Atenuación del sonido, en dB por metro, a una frecuencia de 614 kHz en función del tamaño del sedimento, a cuatro concentraciones diferentes (Tomada y modificada de USGS, 2006)

Comparando los registros de velocidad con los datos de nivel de eco, matriz de *counts* corregida, de un mismo muestreo (campaña de abril de 2006), realizado dentro del delta del río Mira, se determinó que los mayores valores de concentración, representados por altos valores de nivel de eco, coinciden con los períodos de reflujos (i.e. marea bajante), cuando los aportes fluviales son mayores en comparación que los aportes oceánicos (oleaje) (Figura 4.7a). Es en estos períodos de reflujos cuando el río realiza la descarga de todo el material que ha transportado a lo largo de su recorrido (velocidades positivas), desde la parte alta de la cuenca hidrográfica hasta la parte baja, su desembocadura. Por el contrario, cuando suceden los períodos de flujo mareal, se incrementa el nivel del mar, el efecto del oleaje es mayor, y se presenta un estancamiento temporal de los sedimentos, disminuyendo la cantidad de material que es transportado en suspensión.

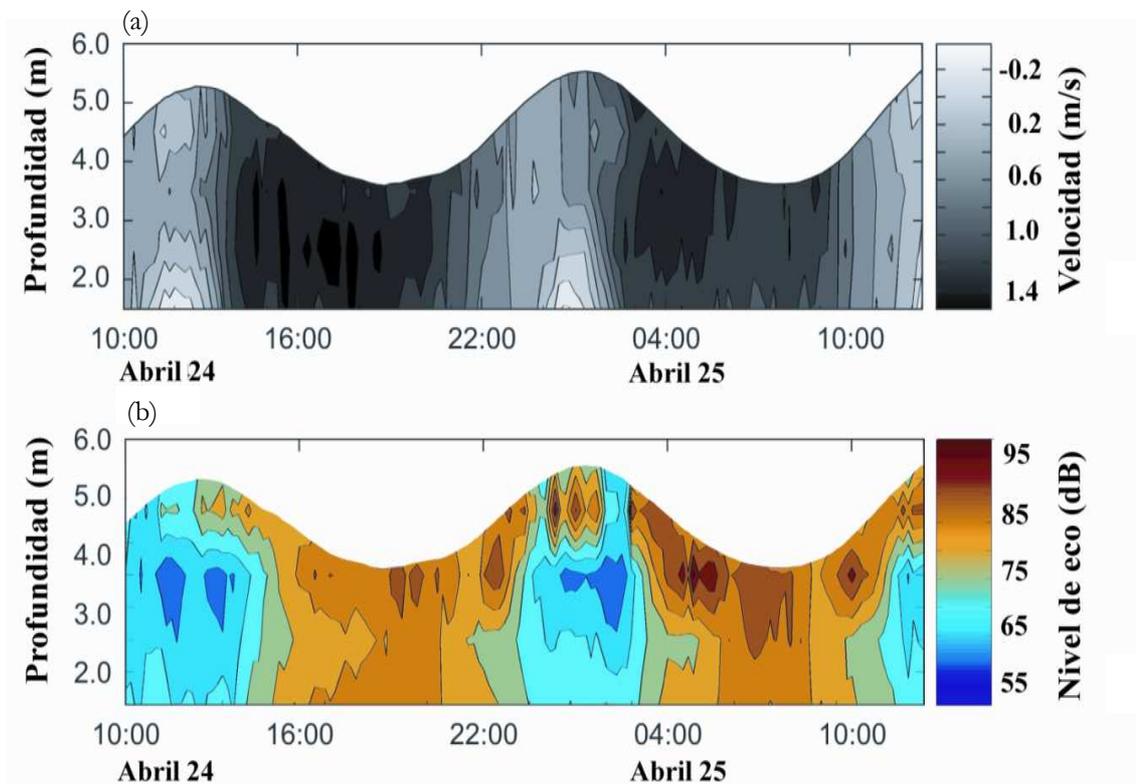


Figura 4.7. a) Registro de velocidad y dirección de la corriente. Los tonos oscuros representan la velocidad a favor del río, los más claros en sentido contrario. **b)** Variación temporal y espacial del nivel de eco (dB), los tonos en café representan los valores más altos.

En la figura 4.7b se observa una franja de color marrón en la parte superior de la gráfica, que se traduce en altos valores de nivel de eco, es probable que ésta se deba a la reflexión del sonido por la superficie, y no a la presencia de altas concentraciones sedimentos. Entre las 22:00 y las 04:00 horas de muestro se registran altos valores de nivel de eco (en la parte superior de la gráfica), en ese caso se puede deducir que se deben a la superficie, teniendo en cuenta que el registro de velocidad muestra una baja influencia de la descargas fluviales y por lo tanto baja presencia de sedimentos en suspensión.

Aplicando la misma rutina a diferentes series de datos, tomados dentro del delta del río Mira, muestran comportamientos similares, es decir revelando una mayor concentración de sedimentos en períodos de marea bajante (Figura 4.8). La figura 4.8a representa un muestreo en el que la variación del nivel de mar no fue tan significativo como si lo fue en el ejemplo de la figura 4.7, sin embargo se puede apreciar la misma relación entre el cambio de nivel del mar y el nivel de eco. Es decir mayores valores de nivel de eco en los períodos de marea bajante. Además, se registran altos valores de nivel de eco cerca al fondo (entre 1.5 y 3 metros por encima del fondo) aún en marea subiente, lo que indica una alta presencia de sedimentos en esta zona de la columna de agua.

De igual manera es posible apreciar, a partir de la figura 4.8b, un incremento en el nivel de eco cerca al fondo, a pesar de la aparente baja concentración de partículas en suspensión, representada por el color azul dominante en la figura. La discontinuidad que se presenta en la serie de datos cerca a la octava hora de muestreo obedece a dificultades técnicas durante el registro de los datos.

La figura 4.8c describe un muestreo en el cual los valores de nivel de eco se mantienen por encima de 50 *dB*, lo que hace suponer una alta presencia de sedimentos durante todo el tiempo de muestreo. Si bien esta última serie de datos, y al igual que todas las anteriores, ha sido editada, eliminando las celdas más cercanas a la superficie, es posible asociar la banda de color naranja (entre 65 y 70 *dB*) a la reflexión del sonido por la superficie, esto teniendo en cuenta los bruscos cambios en el nivel mar asociados a los flujos mareales.

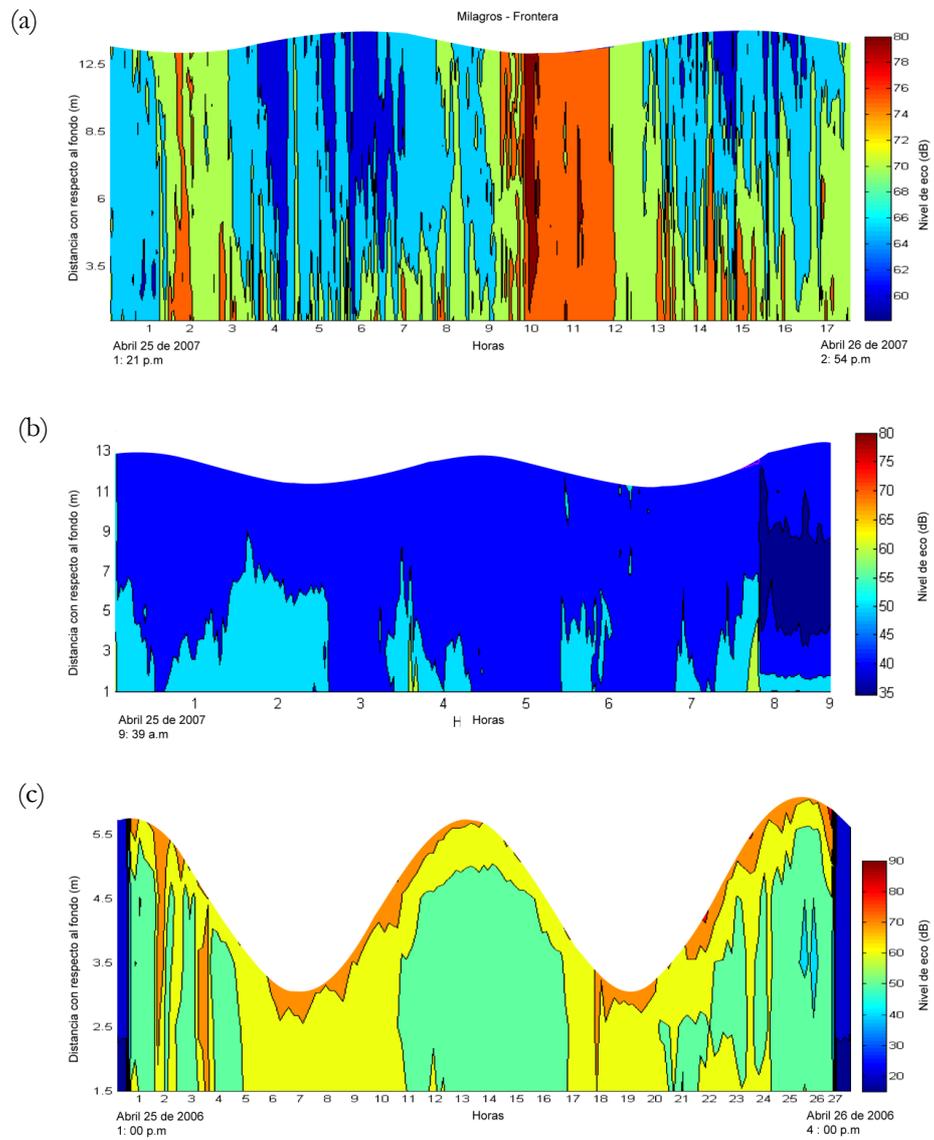


Figura 4.8. Aplicación de la rutina de conversión de *counts* a nivel de eco a diferentes grupos de datos.

4.4. MUESTREO CONJUNTO

4.4.1. Bocatoma del acueducto de Tumaco: Río Mira

La metodología seguida en éste muestreo es recomendada por el *United States Geological Survey* - USGS. Consiste en tomar una sección transversal de río (ancho del río), y dividirla en pequeñas secciones de muestreo. Por medio de un ecosonda se realiza una batimetría para establecer la máxima y mínima profundidades, así como la topografía de la sección transversal del río seleccionada. Se determina, además, el tamaño o ancho del canal. A partir de estos datos se define el número de subdivisiones que tendrá la sección, tanto a lo largo como en profundidad. De esta manera se obtiene una malla de muestreo, como la que se esquematiza en la figura 4.9.

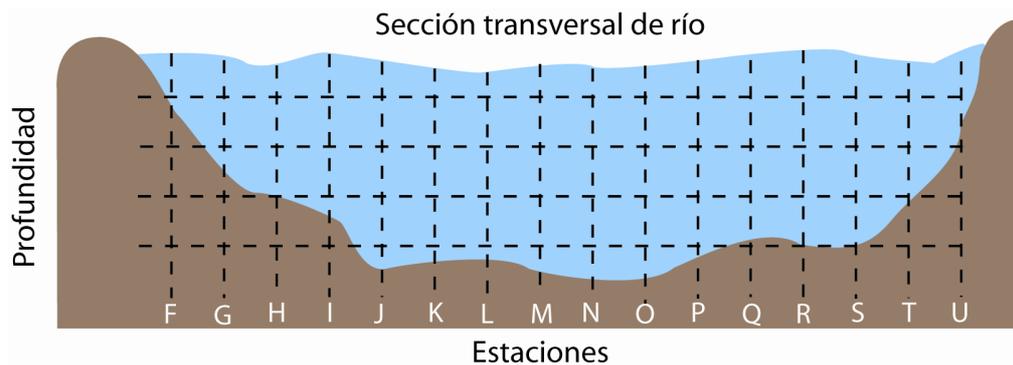


Figura 4.9. Esquema de muestreo para mediciones de caudal en ríos, metodología recomendada por el USGS.

Se trabajó cerca al delta del río Mira en inmediaciones de la bocatoma del acueducto de la ciudad de San Andrés de Tumaco. El ancho de la sección fue de aproximadamente 210 metros. La máxima profundidad registrada fue de 6.75 metros, mientras que el mínimo valor fue de 1.75 *m*. Así, el canal fue dividido en 16 “estaciones de muestreo”, identificadas con las letras de la F a la U, con una separación entre estaciones de alrededor de 10 metros, aunque en las últimas 3 estaciones (entre H y F) la separación fue de aproximadamente 15 metros. Las divisiones de profundidad se tomaron cada metro.

En cada estación de muestreo se realizaron mediciones de concentración y profundidad con el OBS-3A (207), de *counts* con el ADCP, y se recolectaron muestras de agua por medio de una botella Niskin de 5 litros de capacidad. El dispositivo OBS se programó para tomar datos en intervalos de 10 segundos, la duración de cada medición fue de 5 segundos, y la tasa de muestreo se fijó a 2 Hz. El *intervalo* de medición hace referencia al tiempo en segundos entre el inicio de un muestro y el comienzo del siguiente registro. La *duración* se refiere a la cantidad de tiempo en segundos que el sensor OBS está midiendo. La *tasa* o frecuencia indica el número de mediciones por segundo. Se utilizó el mismo intervalo de medición para el ADCP. La frecuencia de emisión del equipo es un valor fijo, 600 kHz, para el caso de dispositivo utilizado durante éste muestreo. El ADCP se ajustó al bote de tal forma que permaneció sumergido durante todo el recorrido; así los transductores quedan dirigidos hacia el fondo. Las muestras de agua recolectadas se tomaron, en la medida de lo posible, cada metro. No se utilizó el total de la muestra recolectada por la botella Niskin; para el análisis de concentración de sedimentos por gravimetría (filtrado) sólo se requiere un volumen de muestra de aproximadamente 500 *ml*.

Para conversión de los valores de *counts* del ADCP a nivel de eco se utilizó la misma rutina empleada para la conversión de los datos de las campañas de abril y septiembre del año 2006 y abril de 2007; con la salvedad de que en ésta oportunidad la celda más alejada (última columna de la matriz) es efectivamente la más profunda, y no, como en el caso anterior, en el que la celda más alejada del dispositivo corresponde a la más superficial. Además, fue necesario eliminar la información de algunas celdas teniendo en cuenta las diferentes profundidades en cada una de las estaciones de muestreo, esto con el fin de evitar eco producto de la reflexión de la onda acústica con el lecho del río.

Para realizar un análisis comparativo entre los resultados de cada uno de los instrumentos se requiere que estos estén midiendo de forma simultánea en el mismo lugar. Ésta condición es difícil de asegurar, por lo que se busca que la ubicación de los instrumentos sea de tal forma que se encuentren dentro de una distribución homogénea de partículas en suspensión, aunque

esto es de igual forma difícil de garantizar. Los datos obtenidos se presentan en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4; en donde cada columna representa las diferentes estaciones de muestreo, y las filas la profundidad a la que se registro el dato. Los espacios en blanco se deben a la ausencia de registro a esa profundidad; mientras que los espacios en gris acotan la forma del lecho del río. La tabla de datos correspondiente a los registros del ADCP se construyó a partir del promedio de los valores registrados por los tres transductores.

Considerando como valor “real” el que se obtiene a partir del filtrado de las muestras de agua (mg/l), se puede observar con respecto a los datos arrojados por el OBS (también en mg/l) una sobrestimación por parte de éste en los registros de concentración. A modo de ejemplo se toman como referencia las columnas R , Q , P y M (estaciones R , Q , P y M), ubicadas a 183, 173, 163 y 133 metros, respectivamente, de la bocatoma del acueducto a lo largo de la sección transversal de río a las que corresponde profundidades de 6.75, 6, 5.6 y 5.7 metros, respectivamente (Figura 4.10). La elección de estas columnas obedece al hecho de que son en las que se registraron mayor número de lecturas tanto con el OBS como con las botellas Niskin (Tabla 4.2).

OBS, concentración (mg/l)																
Metros	U	T	S	R	Q	P	O	N	M	L	K	J	I	H	G	F
0-0,5	61,2			68,6	60,2	8,8										
0,5-1		60,12	64,82	67,96	71,92	70,13			72,28	73,08		75,8	75,76	73,32	74,63	72,8
1-1,5		65,62	66,8	70,08	72,6	71,6			73,6	75	75,8	75,75		74	74,73	
1,5-2			70,12	71,56	73,1	72,05			74,9	80,5	76,2	76,5		74	74,06	
2-2,5			73,4	72,25	75,73	74,86			75,2	79,2	78,6		116,8		74,86	
2,5-3			84,45	72,45	74,1				78,05		76,8		78		75,63	
3-3,5			72,4	74,4	76,4	72,8				79,2	79,4				76,3	
3,5-4			76,93	77,4	72,8				79,3		82,2	78				
4-4,5				76,8	77				84,8			82,8	79			
4,5-5				81,6						81		83,4	83			
5-5,5				84,35						87			93,8			
5,5-6										96,6						

Tabla 4.2. Medidas de concentración con el OBS – 3A.

Niskin (mg/l)																
Metros	U	T	S	R	Q	P	O	N	M	L	K	J	I	H	G	F
1	32,7	40	47,2	36,3	52,3	35,2	32,5	33,2	31,9							39,4
2	26,1	32,8	41,9	42,8	54,3	40,6	42,4	50,6	56,7							
3				43,4	32,8	49,4	45,3	40,6	53,4			49,7				
4				49,2	51,5	49,5	41,6	51,2	23,4	54,2	41,8	40,1	52,6		48,1	
5					45,2	42,9	43,2	40,3	62,9	35,9		47,5				
6								58,4	60,7				48,3		44	

Tabla 4.3. Medidas de concentración a partir de muestras de agua recolectadas con botellas Niskin.

ADCP (Nivel de eco - dB)																
	U	T	S	R	Q	P	O	N	M	L	K	J	I	H	G	F
0,5-1	85,113711	62,323711	69,956211	72,536211	43,618711	41,576211	66,265378	60,102044	61,893711	61,392044	46,628711	63,828711	70,386211	61,356211	68,472711	72,572044
1-1,5	74,005197	62,144363	70,995197	73,951447	42,569125	38,745197	64,867697	58,13103	60,49603	57,127697	37,49103	59,277697	70,887697	60,567697	69,167697	77,48103
1,5-2	68,216126	79,216959	72,139876	74,612376	43,322197	38,653626	64,811959	57,430293	60,583626	56,068626	35,213626	57,860293	71,763626	60,261126	69,957626	
2-2,5			72,777722	75,250222	44,128972	38,968972	65,700639	58,175639	60,827305	55,953972	35,242305	58,605639	72,293972	60,576472	70,444972	
2,5-3			78,382251	75,909751	44,58118	40,112251	66,163085	58,853085	62,364751	56,129751	36,063085	58,853085	72,577251	60,967251	70,921751	
3-3,5			78,635818	77,023318	45,095818	41,333318	66,954152	59,715818	62,797485	56,920818	36,352485	59,285818	73,368318	61,328318	71,239818	
3,5-4			69,680268	77,581518	46,168482	42,482768	68,211101	60,256101	64,269435	57,819435	37,179435	59,969435	74,947768	61,725268	71,292768	
4-4,5			70,209168	78,755418	47,227203	43,710418	69,187918	61,232918	64,242918	57,936251	38,156251	59,942918	75,530418	62,522918	71,294918	
4,5-5				86,486405	48,669441	44,722655	70,271822	62,675155	65,255155	59,235155	39,025155	64,251822	78,155155	66,652655		
5-5,5				93,700116	52,481545	46,292616	75,855116	67,470116	68,831783	64,316783	46,11345	70,336783	87,572616			

Tabla 4.4. Promedio del nivel de eco registrado por los tres transductores..

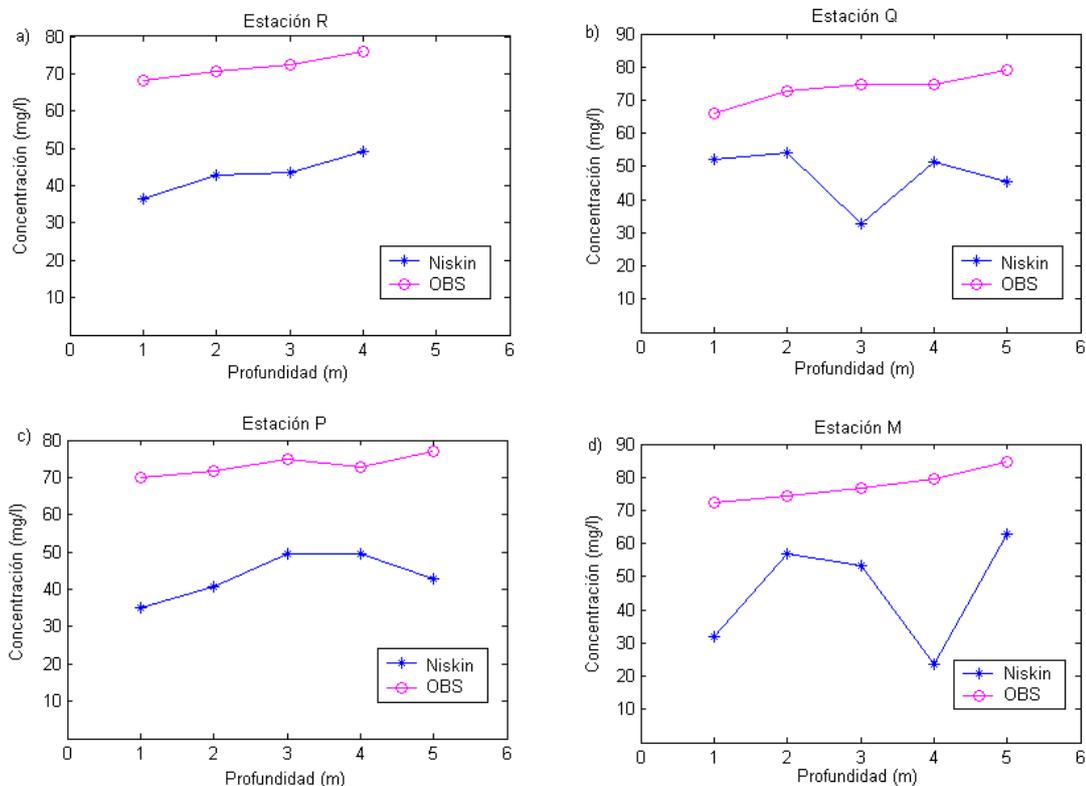


Figura 4.10. Comparación entre los registros de concentración tomados con una botella Niskin y el dispositivo OBS. **a)** Estación R, **b)** Estación Q, **c)** Estación P, **d)** Estación M.

De acuerdo al modelo teórico sobre la dinámica sedimentaria (Ver capítulo 2) se espera que de acuerdo a la disposición de los sedimentos su concentración aumente cerca al fondo. Los registros del OBS muestran una tendencia acorde con ésta disposición. Sin embargo, los valores obtenidos mediante el análisis gravimétrico de las muestras tomadas con las botellas Niskin presentan un comportamiento diferente. Los registros en la estación R, en donde a pesar de la sobrestimación por parte del OBS de los valores de concentración, se observa un incremento similar en la CSS. En las demás estaciones se puede percibir incrementos similares <sobre todo en aguas más superficiales, por debajo de 2 metros. Para profundidades mayores a 2 metros la creciente velocidad de la corriente del río, cercanas a 1 m/s (Figura 4.11), impidió garantizar que las muestras de agua hayan sido recolectadas a la misma profundidad a la que se

encontraba el OBS; la poca relación entre los registros del OBS y los de la botella Niskin puede ser causada por ésta situación.

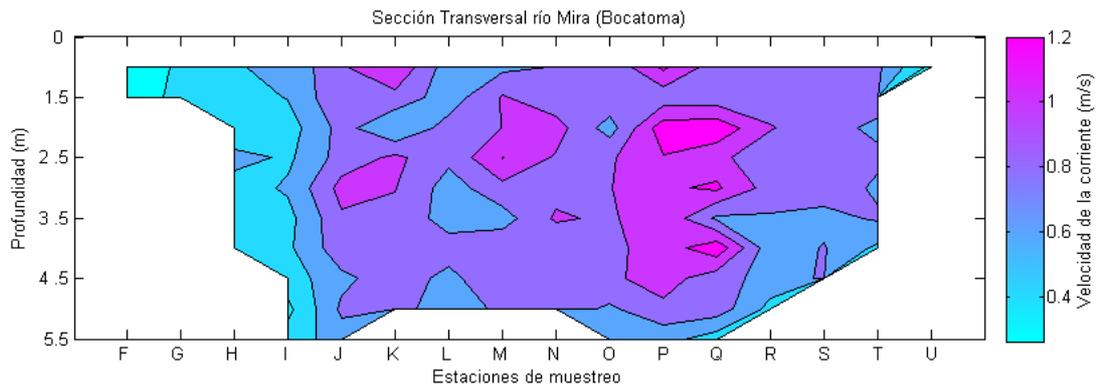


Figura 4.11. Velocidad de la corriente en una sección transversal del río Mira, en inmediaciones de la bocatoma del acueducto del municipio de San Andrés de Tumaco. Los tonos violetas representan las mayores velocidades, mientras que los tonos azules muestran las velocidades más bajas.

En la Tabla 4.3 se muestran las matrices de nivel de eco, obtenida a partir del promedio de los registros de *counts* que arrojan cada uno de los tres transductores del ADCP. El nivel de eco, que es directamente comparable con valores de concentración (Ver capítulo 3), presenta un incremento en su valor a medida que los registros se encuentran más cerca al fondo del río. Considerando que el tamaño de las partículas en suspensión es homogéneo durante todo el muestreo, es correcto afirmar que un aumento en el nivel de eco corresponde a un incremento en la concentración de partículas en suspensión. Así, el monitoreo realizado con el ADCP muestra un incremento en la CSS, con la misma tendencia que el OBS (Figura 4.12).

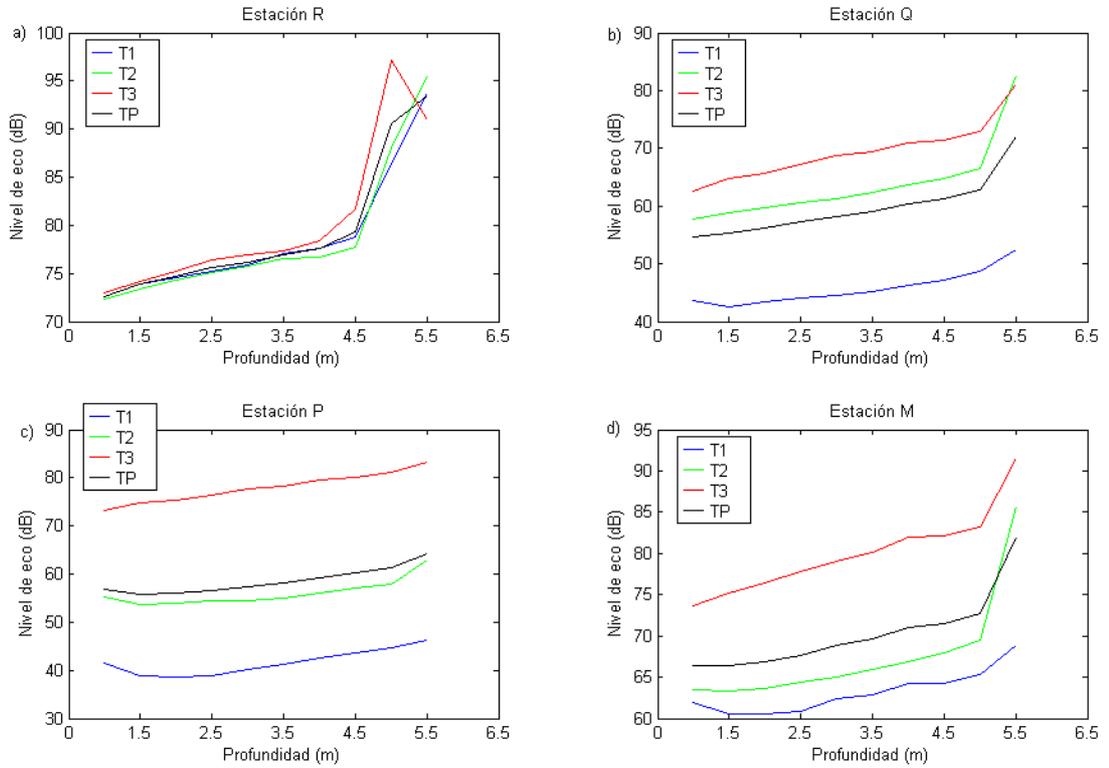


Figura 4.12. Nivel de eco medido en las estaciones **a) R**, **b) Q**, **c) P** y **d) M**. En las gráficas, T1, T2 y T3 hacen referencia a la medida de los transductores 1, 2 y 3 respectivamente; TP representa al promedio de los tres transductores.

No fue posible establecer una relación de concurrencia entre los valores de concentración tomados con las botellas Niskin y el ADCP. El ADCP permaneció sumergido a una profundidad media de 0.5 metros, lo que permitió que los efectos de la corriente no fueran tan fuertes sobre él, como sí lo fueron sobre las botellas Niskin o el OBS que realizan muestreos puntuales, por lo tanto requieren ser sumergidos a una mayor profundidad.

4.4.2. Bahía de Tumaco

Se realizó un segundo muestreo utilizando conjuntamente el ADCP, el OBS y botellas Niskin, esta vez dentro de la bahía de Tumaco. El dispositivo OBS-207 (calibrado con partículas de 0.3 *mm*) fue sumergido a una profundidad aproximada de 6 metros. Se configuró en modo muestreador con un intervalo de medición de 10 minutos para realizar mediciones de concentración, turbidez, profundidad y salinidad. Por su parte el ADCP fue sumergido, junto al OBS, de forma tal que los transductores permanecieron dirigidos hacia el fondo durante todo el tiempo de muestreo. Su intervalo de medición también fue de 10 minutos. Los equipos registraron datos durante un tiempo promedio de 30 horas. Coincidiendo con el intervalo de medición de los equipos, por medio de una botella Niskin se tomaron 25 muestras de agua, cada una con 1 litro.

El OBS registró una profundidad máxima de 6.38 metros (altura de la columna de agua sobre el dispositivo) y una mínima de 3.66, lo que se traduce en un cambio en el nivel del mar de aproximadamente 2.72 metros, durante el tiempo de muestreo. Por su parte el ADCP registró una profundidad máxima de 5.07 metros y una mínima de 2.19 metros, es decir un cambio de nivel aproximado de 2.88 metros. Lo anterior indica que el OBS se ubicó a una distancia vertical aproximada de 1.3 metros del ADCP. Con lo anterior, y teniendo en cuenta que el tamaño de las celdas y la distancia de blanqueo es de 0.5 metros, se determinó que la región censada por el OBS corresponde en profundidad a la segunda celda del ADCP. No hubo certeza en cuanto a la profundidad a la que fueron tomadas las muestras de agua por medio de la botella Niskin, aunque por medio de un cabo (soga), cuya longitud fue previamente dividida en metros, fue posible sumergir la botella a una profundidad aproximada de 6 metros.

De nuevo se supone como punto de referencia la concentración estimada a partir del análisis gravimétrico de las muestras de agua tomadas con la botella Niskin. Los registros de concentración oscilaron entre 4.2 y 20.4 *mg/l*, (valor mínimo y máximo de concentración) (Figura 4.13a). Para el análisis la serie de datos se divide en 3 regiones teniendo en cuenta los

horarios de muestreo, de tal forma que la primera región (i) corresponde a los primeros 7 registros (día uno), la segunda región (ii) a los siguientes 15 datos (día 2 – en la mañana), y para finalizar la tercera región (iii) correspondiente a los último 3 datos (día 2 – en la tarde). En la región (i) se tiene una concentración promedio de 6.4 mg/l , se observa un valor pico de 8.2 mg/l (dato 3) y un valor mínimo de 4.2 mg/l . (dato 2) El poco incremento relativo en los índices de concentración se debe a que esta primera región corresponde a 70 minutos de muestreo, tiempo en el cual no hay un cambio apreciable en el nivel del mar (valor mínimo 6.21 metros, valor máximo 6.25 metros, correspondiente a marea subiente), por el contrario el nivel se mantiene prácticamente constante (Figura 4.13b). Iniciando la región (ii) se observan cambios bruscos en los índices de concentración, por ejemplo de 15.7 a 6.7 mg/l (datos 8 y 9) o de 9.9 a 4.9 mg/l (datos 11 y 12). Dado que esta región comprende un mayor intervalo de tiempo (150 minutos) los cambios en el nivel del mar son notorios (valor mínimo 3.66 metros, valor máximo 4.48 metros). Este constante cambio de nivel se relaciona con una variabilidad en la cantidad de agua que llega a la costa, diferentes cantidades de agua que transportan distintas porciones de sedimentos en suspensión. Los datos correspondientes a la región (iii) fueron registrados durante un período de flujo mareal (marea subiente), a partir de lo cual se da cuenta de los altos picos de concentración (20.4 y 16.9 mg/l , datos 24 y 25).

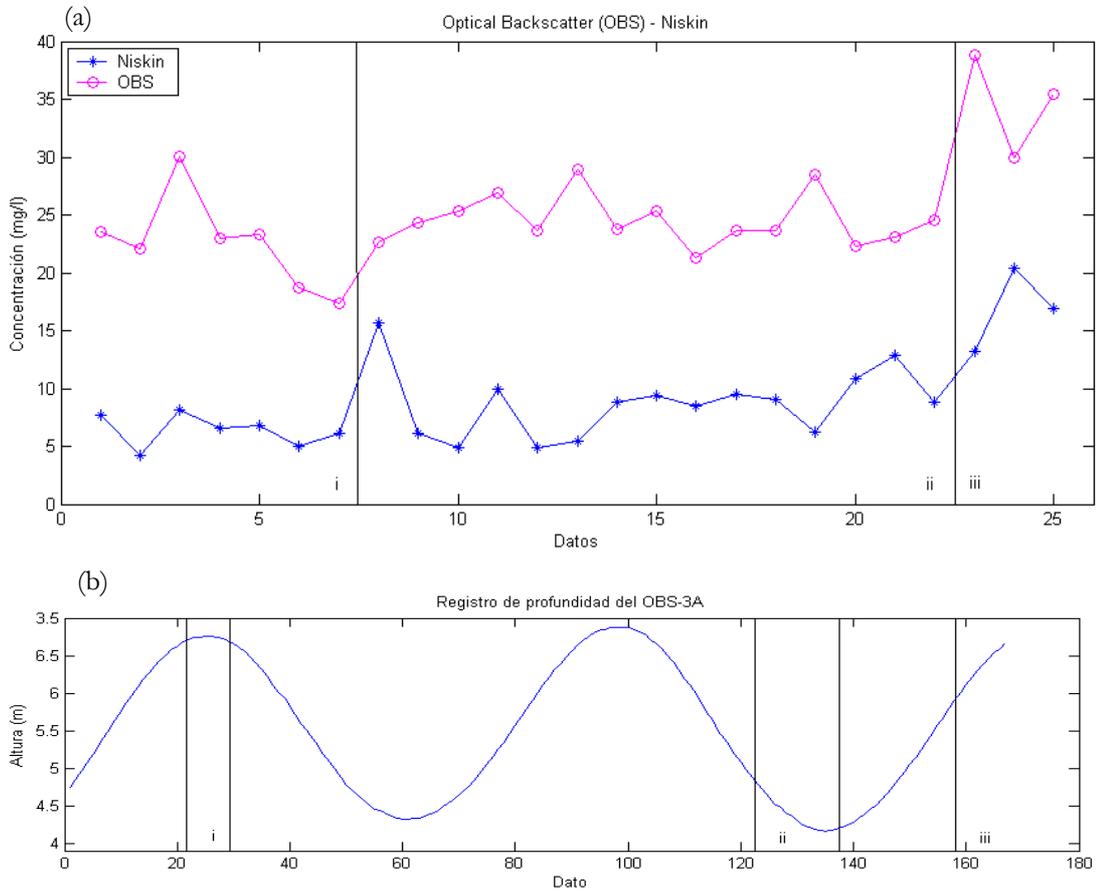


Figura 4.13. a) Registro de CSS obtenido a partir de muestras de agua recolectada con una botella Niskin y un dispositivo OBS-3A, dentro de la bahía de Tumaco. Los numerales i, ii, iii representan las diferentes secciones en las que se dividió la serie de datos para su análisis. **b)** Registro de la altura de la columna de agua sobre el OBS.

Al igual que con la serie de datos obtenida a partir de las botellas Niskin, los registros del OBS son divididos en tres regiones para su análisis (i, ii, iii) (Figura 4.13a). Tomando como base los datos de la botella Niskin se advierte una sobrestimación en los valores de concentración por parte del OBS. En la región (i) El OBS establece un rango de concentración que varía entre los valores 17.4 mg/l y 30.1 mg/l . Se puede observar cierta relación punto a punto entre los

incrementos y decrementos de concentración obtenidos con el OBS y la botella (datos 1, 2, 4 y 5), sin embargo algunos muestran notorias diferencias. Por ejemplo el dato 3 representa en ambas series de datos la mayor concentración (8.2 *mg/l* con la botella, 30.1 *mg/l* con el OBS), a pesar de esta similitud el incremento de cada uno en comparación con el dato anterior (dato 2: 4.2 *mg/l* para la botella, 22.1 *mg/l* para el OBS) es proporcionalmente diferente, hecho que es evidente con el marcado pico en el registro del OBS. El dato 7 es otro ejemplo de incongruencia entre registros, mientras con el OBS se obtiene un decremento, con la botella Niskin un incremento. La región (ii) muestra marcadas diferencias en los registros a excepción de los datos 12, 13, 15, 16, 17, 18 y 19, que muestran similares tendencias. A pesar de la diferencias entre registros hay un elemento común a las dos series de datos, y se encuentra en la región (iii); es en esta sección en donde se encuentran los valores más altos de toda la serie (13.2 *mg/l*, 20.4 *mg/l* y 16.9 *mg/l* para la botella Niskin; 38.8 *mg/l*, 29.9 *mg/l* y 35.4 *mg/l* para el OBS), que como ya se mencionó coinciden con un período de flujo mareal. Partiendo del hecho de que el intervalo de medida del OBS fue de 10 minutos se puede afirmar que los altos valores registrados en esta sección corresponden en efecto a una distribución de elementos en suspensión que permanecieron por más de 30 minutos en el campo de medición del equipo, es decir, no fueron elementos pasajeros; los altos registros de las botellas Niskin comprueban este hecho.

Aplicando el algoritmo de conversión de unidades (*counts*-Nivel de Eco) se estableció la respuesta del ADCP. La figura 4.14 muestra el registro de cada uno de los transductores del ADCP, así como su promedio. Nuevamente se dividió la serie de datos en tres regiones (i, ii, iii) distintas para su análisis. Se aprecian diferencias entre los registros de cada transductor; sobre todo en la región (i) donde los valores muestran una tendencia variable. La región (ii) muestra un comportamiento más estable que corresponde con la tendencia que muestran los datos 14, 15, 16, 17 y 18 en ésta misma región pero en la serie de datos registrados a partir de la botella Niskin. Es de resaltar que existe una correspondencia en la última región (iii) entre los registros del ADCP, del OBS y la botella Niskin. Al igual que los casos anteriores en esta

región se registran los valores pico de toda la serie, una situación común, además, a los tres transductores (T1: 76.831 *dB*; T2: 75.111 *dB*; T3: 76.401 *dB*; TP: 75.254 *dB*), sin embargo estos valores no son registrados en la misma posición dentro de la serie, es decir, mientras el mayor registro de T1, T3 se da en el dato 25 (último dato), en T2 se presenta en el dato 24.

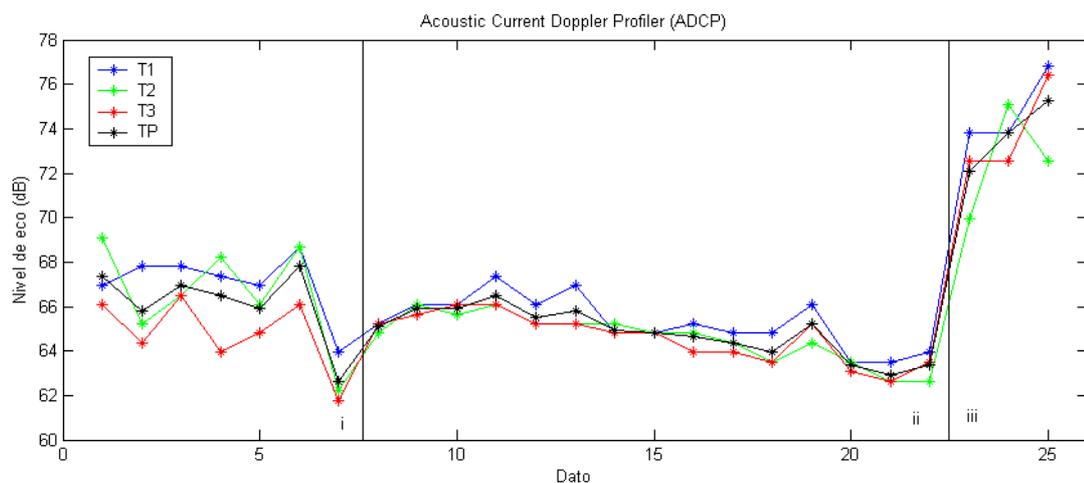


Figura 4.14. Nivel de eco registrado por el ADCP. En las gráficas, T1, T2 y T3 hacen referencia a la medida de los transductores 1, 2 y 3 respectivamente; TP representa al promedio de los tres transductores.

El proceso de conversión de las unidades internas del ADCP (*counts*) a CSS, empieza con la corrección de la señal acústica, convertir el valor a *counts* a nivel de eco (*dB*), y concluye con la elaboración de una curva de ajuste entre estas dos cantidades. De acuerdo a los datos obtenidos en este muestreo, y tomando como referencia el valor promedio de los tres transductores, se realizó una comparación entre estos y los registros de concentración obtenidos a partir de la botella Niskin (Figura 4.15). De acuerdo con Gartner (2002) (Ver ecuación 3.13, Capítulo 3) para la construcción de esta relación se toma como variable dependiente al logaritmo en base 10 de la concentración, y como variable independiente al

nivel de eco, medido en *dB*. Se observa una baja correlación entre las variables ($R^2=0.2$), lo que impide que se pueda realizar una equivalencia entre valores de concentración y nivel de eco.

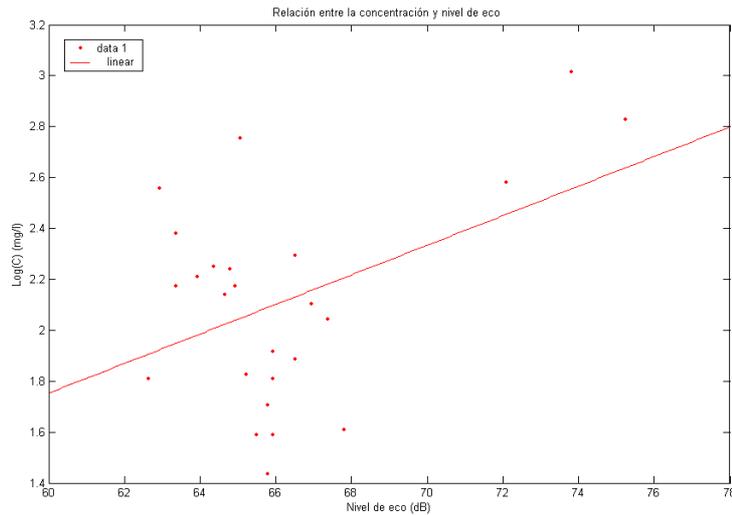


Figura 4.15. Relación entre el logaritmo en base 10 de la concentración y el nivel de eco.

La principal razón por la cual se da esta baja correlación entre las variables, se debe a las condiciones del muestreo. No es posible garantizar que en el momento de la recolección de muestras de agua con sedimento en suspensión por medio de la botella Niskin no se estén alterando las condiciones del muestreo (e.g distribución de los sedimentos, turbulencia) para los equipos OBS y ADCP. Cabe aclarar además que la intensidad de la señal acústica no sólo es influenciada por los sedimentos en suspensión. Las burbujas y el material biológico presente en la zona de muestreo también esparcen cierta cantidad de energía acústica; por lo tanto los resultados que se puedan extraer del ADCP son más un indicador de la cantidad de sedimentos en suspensión, que un valor de su concentración (Dinehart y Burau, 2005).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se calibró un dispositivo OBS-3A para hacer mediciones de CSS. Como patrón de calibración se utilizó sedimento seco y desagregado de la zona, cuyo tamaño varió entre los 0.1 y 0.3 *mm*. La curva de calibración encontrada cumple con el requisito de validez propuesto por el fabricante: magnitud promedio de los residuos menor al 1% del rango de medición.

Sin embargo, se recomienda mejorar el montaje de calibración prestando mayor atención al sistema rotor que mantiene en suspensión al conjunto de sedimentos. Es de gran importancia controlar de manera precisa la velocidad con la que se genera la turbulencia dentro del tanque para evitar la producción excesiva de burbujas, así como la formación de flóculos. Otro punto a considerar dentro del montaje de calibración es el tanque: se debe procurar que éste sea de fondo redondo, sin esquinas, para evitar la acumulación de sedimentos; estas recomendaciones se hacen con el ánimo de reducir la sobrestimación encontrada en las mediciones de concentración realizada por el OBS en comparación a los registros obtenidos mediante el análisis de muestras de agua. Si bien existen estudios exitosos en los que se ha utilizado el OBS en mediciones de CSS, no hay una metodología confiable para su calibración. Hay reportes del uso de glicerol en lugar de agua, como fluido en cual permanecerán los sedimentos, lo que permite hacer mediciones con mayor facilidad, aunque con algunas limitaciones en cuanto a la concentración máxima que se puede calibrar. Se hace necesario definir una metodología de calibración para sistemas OBS.

Teniendo en cuenta los resultados dispares en las mediciones de concentración obtenidos con el OBS cuando es calibrado con diferentes tamaños de sedimento, se recomienda utilizar este dispositivo de medida en aguas en donde el tamaño de los sedimentos permanezca lo más homogéneo posible. Dado que lo anterior es difícil de garantizar, se recomienda hacer un riguroso estudio previo acerca del tamaño medio de los sedimentos con el fin de utilizarlo en proceso de calibración, y así garantizar mediciones más precisas.

Se aplicó una ecuación de ajuste a los valores de amplitud de la señal registrada por el ADCP, con el fin de utilizar dicho parámetro como un estimador de la concentración de los sedimentos en suspensión. Con esta ecuación se consiguieron valores de intensidad únicamente dependiente de los sedimentos en suspensión, y no valores alterados por la dispersión de la señal acústica en el agua, o la absorción de ésta por parte del agua y los propios sedimentos. El valor de intensidad ya corregido (nivel de eco), dado en decibels, es directamente comparable con valores de concentración.

Al aplicar la ecuación de corrección a una serie de datos registrados durante campañas realizadas en los años 2006 y 2007 en inmediaciones del delta del río Mira, se encontró que los registros de nivel de eco presentan un incremento cerca al fondo que coincide con las predicciones teóricas que suponen mayores concentraciones de sedimentos cerca al fondo, asumiendo una directa proporción entre estos dos parámetros. Se registraron además variaciones en el nivel de eco relacionadas con el flujo y reflujo mareal, asociados a su vez con los periodos de descarga del río.

Se realizaron dos muestreos conjuntos, es decir, muestreos en los cuales se utilizó tanto el OBS como el ADCP y una botella Niskin; esto con el fin de realizar una comparación entre las tres mediciones. En el primero de ellos realizado en el delta del río Mira (alta influencia del río) se encontró una baja relación entre los registros obtenidos con la botella Niskin (patrón de comparación) y los dispositivos OBS y ADCP, esto debido principalmente a las condiciones del muestreo. Los datos del OBS y del ADCP mostraron una tendencia similar al registrar incrementos de concentración y nivel eco, respectivamente. En el segundo muestreo realizado dentro de la bahía de Tumaco (baja influencia del río) aunque no fue posible establecer relaciones cuantitativas entre los registros de concentración del OBS y los extraídos de la botella Niskin, así como entre los datos de nivel de eco y concentración, es posible apreciar a partir de la correspondencia entre algunos datos que los dispositivos OBS y ADCP son sensibles a los cambios de concentración.

Es recomendable utilizar el OBS para buscar una relación válida entre los valores de nivel de eco y los registros de concentración, aunque para las mediciones del OBS deben ser cotejadas con medidas de concentración extraídas a partir de botellas Niskin, para determinar su grado de certeza. Es necesario además diseñar una metodología de muestreo que permita asegurar que las mediciones del OBS y la botella Niskin se realicen a la misma profundidad y dentro del mismo intervalo de tiempo, para poder obtener relaciones de ajuste entre las respuestas de ambos dispositivos. Durante ese muestreo se debe procurar que la extracción de la muestra de agua no interfiera con la medición del OBS. También es necesario determinar el grado de confiabilidad de la botella Niskin en la medición de CSS, teniendo en cuenta que es un tipo de muestreador no – iso cinético, que además ingresa de manera perpendicular a la dirección de flujo de los sedimentos.

BIBLIOGRAFÍA

AARDOOM, Jeroen H. 2006. Quantification of sediment concentrations and fluxes from ADCP measurements. Xèmes Journées Nationales Génie Civil.

ALVAREZ, L.G.; JONES, S.E. 2001. Factor Influencing Suspended Sediments Flux in the Upper Gulf of California. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 54, pp. 747-759.

BORN, Max; WOLF, Emil. Principles of optics – 7th ed. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 1999. Pág. 195

Centro Control Contaminación del Pacífico –CCCP. Aportes al entendimiento de la Bahía Tumaco: Entorno oceanográfico, Costero y de Riesgos. 2003

CREED; PENCE; RANKIN. 2001. Inter Comparison of Turbidity and Sediment Concentration Measurements from an ADCP, an OBS-3, and a LISST. New Jersey Department of Environmental Protection.

CORREA I.; RESTREPO J. Geología y Oceanografía del Delta del río San Juan (Litoral Pacífico Colombiano). Fondo Editorial Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. 2002.

DINEHART, R.L.; BURAU, J.R. 2005. Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. *Journal of Hydrology*, 314, pp. 1-21.

DYER, K., 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: Perillo, G.M (ed.). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology*.

FETTWEIS; FRANCKEN; PISON; VAN DEN EYNDE. 2006. Suspended particulate matter dynamics and aggregate sizes in a high turbidity area. *Marine Geology*, 235, pp. 63-74.

GARTNER, W. 2002. Estimation of suspended solids concentration based on acoustic backscatter intensity: Theoretical background. *Turbidity and Other Sediments Surrogates Workshop*. Reno.

GUILLEN, J; PALANQUES, A; PUIG, P; DURRIEU DE MADRON, X; NYFFELER, F. Field calibration of optical sensors for measuring suspended sediment concentration in the western Mediterranean. 2000. *Scientia Marina*, 64 (4): 427-435.

HOLDAWAY, P.; THRONE, D.; FLATT; JONES, E.; PRANDLE. 1999. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 19, pp. 421-441.

KINSLER E. Lawrence; FREY R. Austin. *Fundamental of Acoustics*. Editorial John Wiley & Sons, Inc. New York. 1961. Pág. 433-466.

KOSTASCHUK; BEST; VILLARD; PEAKALL; FRANKLIN. 2004. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, 68, pp. 25-37.

LOHRMANN; Nortek AS. Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments. Nortek Technical Note No.:003. Document No. N4000-712. Octubre 15, 2001.

LONIN, S.; PARRA, C.; ANDRADE, C.; THOMAS, Y. 2004. Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la bahía de Cartagena. Boletín Científico No 22 – CIOH, Cartagena, pp. 77-89.

MARTÍN, V. Juan P. Ingeniería Fluvial. Centro Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia. 2000

MASSELINK, Gerhard; HUGHES, Michael. An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Oxford University Press. U.K. 2003. Pág. 104-140.

MEADOWS, P.S., CAMPBELL, J.L. 1981. Introducción a las ciencias del mar. Acribia. Zaragoza (España).

MONSALVE SAÉNZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. Segunda edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia. 1995. Pág. 345-360.

Nortek AS. User guide AWAC acoustic wave and current meter. 2004. Noruega.

OLSEN, Eugen. 1986. Métodos ópticos de análisis. Editorila Reverté, S.A. Barcelona.

PULEO, J. Effect of Bubbles on Optical Backscatter sensors. Center for Coastal Research. Department of Civil and Engineering. University of Delaware

RESTREPO, J D. Los sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental. Fondo Editorial Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. 2005.

RESTREPO, J D; LÓPEZ, S A. Morphodynamics of the Pacific and the Caribbean deltas of Colombia, South America. 2007. Journal of South American Earth Sciences.

Scientific Fishery System, Inc. Final Report of Phase 1. Small Bussines Innovation Research Project “Automated Broadband Acoustic Sound Velocity Profiler”. 1998. Disponible en Internet en la dirección:

www.alaska.net/~scifish/ResearchAndDevelopment/AcousticVelocityProfilerFinal%20Report.doc. (Acceso 3 de Febrero de 2008)

SUÁREZ, D. Jaime. Control de erosión en zonas tropicales. División Editorial y de Publicaciones, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2001

THORNE, D., HANES, M. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. 2002. Continental Shelf Research, 22, pp. 603-632.

United States Geological Survey (USGS). Field Methods for Measurements of Fluvial Sediments. Techniques of Water-Resources Investigation of the U.S. Geological Survey. Book 3, Application of Hydraulics. 1999. 89 p.

United States Geological Survey (USGS). Instruction Manual for U.S. Geological Survey Sediment Observers. Illinois, USA. 1997. Disponible en Internet en la dirección: il.water.usgs.gov/pubs/ofr96_431.pdf.

United States Geological Survey (USGS). Techniques for water resources investigation: Chapter A2, Selection of equipment for water samplings. 2003. Disponible en Internet en la dirección: water.usgs.gov/owq/FieldManual/Chapter2/ChapterA2_V2uncompressed.pdf

United States Geological Survey (USGS). Use an ADCP to Compute Suspended-Sediment Discharge in the Tidal Hudson River, New York. Scientific Investigations Report 2006-5055. Disponible en Internet en la dirección: pubs.usgs.gov/sir/2006/5055/pdf/SIR2006-5055.pdf. (Acceso 30 de Enero de 2008)

VAN RIJN, L.C. Principles of transport in Rivers Estuaries and Coastal Seas. AQUA Publications. Amsterdam, Holanda. 1993.