

RADIOMETRÍA EN MEDIOS ACUÁTICOS

Seminario de Radiometría de Campo 3-XII-2009

Dr. José Antonio Domínguez Gómez
Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)
jose.a.domínguez@cedex.es

1. INTRODUCCIÓN

La energía electromagnética procedente del sol, atraviesa la atmósfera terrestre y llega a la superficie solo en aquellas longitudes de onda que no es absorbida por columna de aire que constituye la atmósfera.

EL mismo fenómeno ocurre si la superficie terrestre corresponde a una masa de agua, se produce un cambio de medio, aire—agua, por lo tanto hay que tener en cuenta la trasmisividad del agua ($t=0.99$) y la velocidad de propagación de la energía en el agua, representado por el índice de refracción ($m=n+ik$).

$$L_{\text{aire}} = L_{\text{agua}} \cdot t / n_{\text{agua}}$$

L_{aire} radiancia en el aire

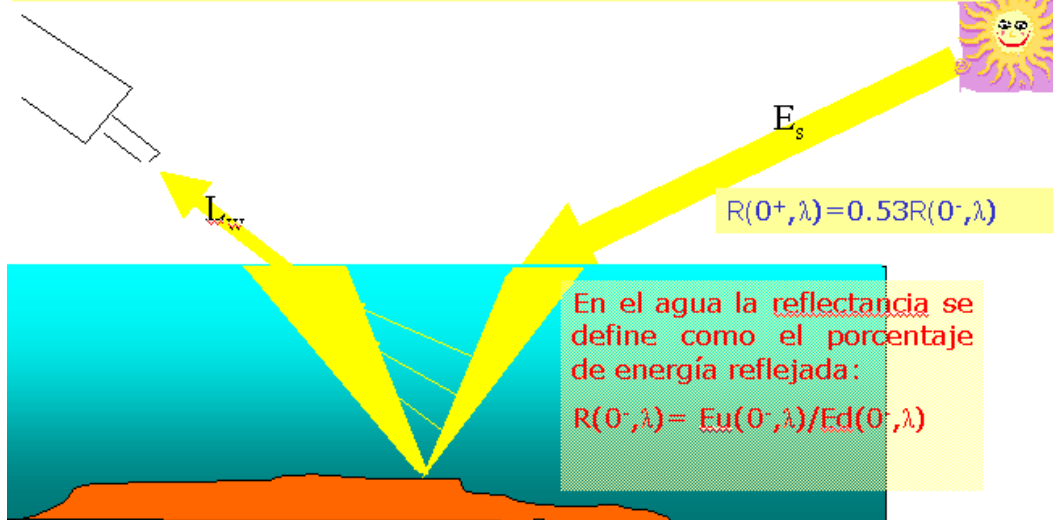
L_{agu} radiancia en el agua

t trasmisividad del medio

n índice de refracción del medio acuático, varía entre 1,33 para aguas claras y 1,34 en aguas turbias

En Ecosistemas Acuáticos:

$$R(0^+, \lambda) = L_w(0^+, \lambda) / L_s(0^+, \lambda) = \Pi L_w(0^+, \lambda) / \Pi L_s(0^+, \lambda) = \Pi L_w(0^+, \lambda) / E_s(0^+, \lambda)$$



2. COMPORTAMIENTO DE LA ENERGIA EN EL AGUA: PROPIEDADES APARENTES DEL AGUA

2.1. COEFICIENTE DE ATENUACIÓN DE LA LUZ

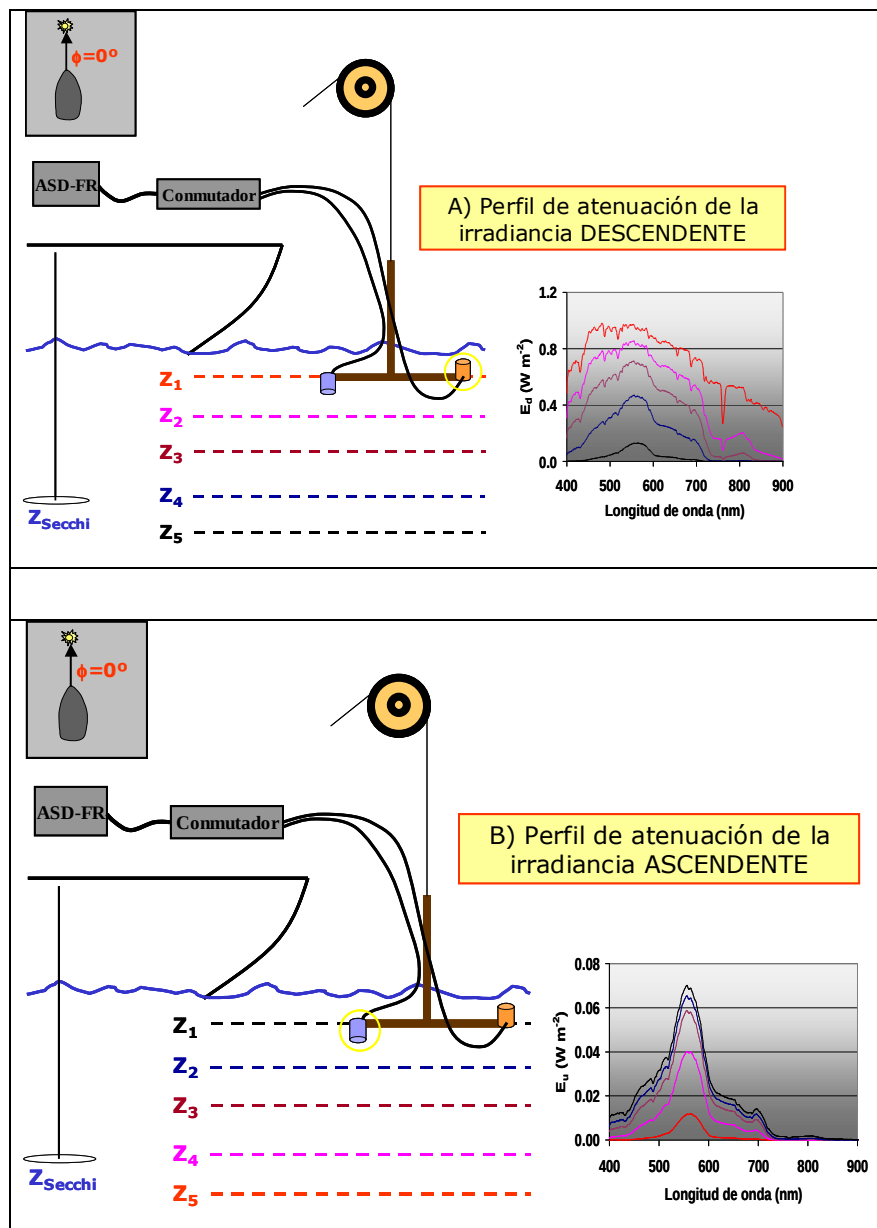
La energía en el agua procedente del Sol desciende (downwelling) y se va atenuando siguiendo la ley de Lambert-Beer:

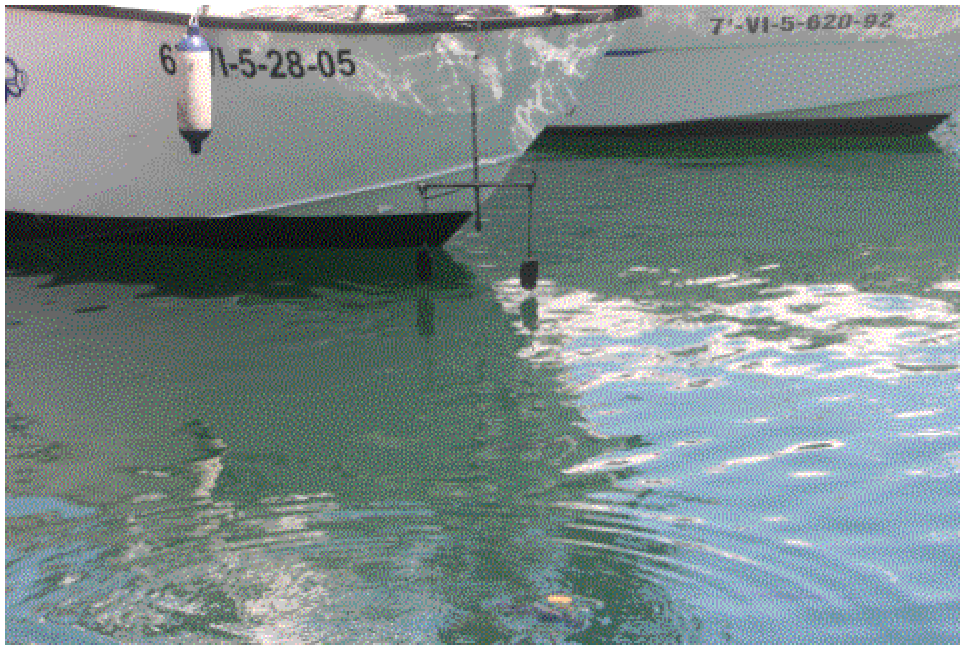
$$E_d(\lambda, z) = E_d(\lambda, 0^-) \exp(-k_d Z) = E_d(\lambda, 0^-) \exp(-\zeta)$$

ζ espesor óptico

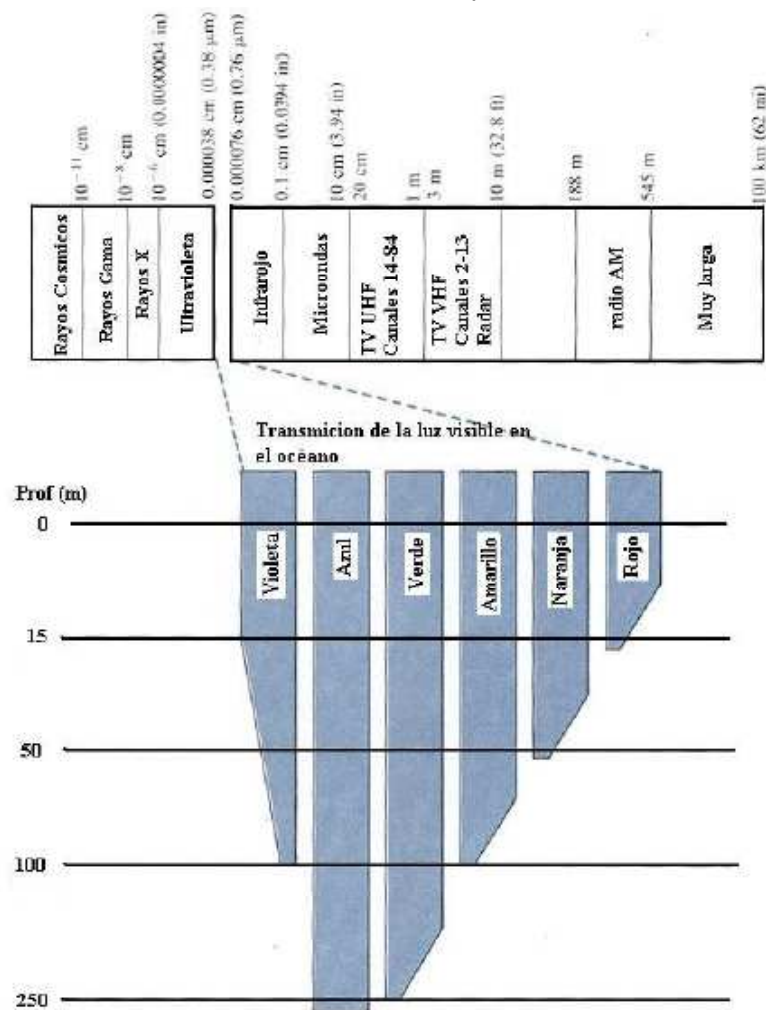
La energía puede atenuarse en la columna de agua o puede llegar al fondo, en este momento parte de la misma asciende (upwelling) y siguiendo la ley de Lambert-Beer:

$$E_u(\lambda, z) = E_u(\lambda, 0^-) \exp(-k_u Z)$$





Sistema de perfiles de radiancia en el agua con fibras ópticas sumergibles y cosenos receptores



Espectro electromagnético y trasmisión de la luz en aguas oceánicas

Los coeficientes de atenuación dependen del mayor o menor porcentaje de componentes existentes en el agua (agua, materia orgánica disuelta, pigmentos fotosintéticos, materia particulada, y un residuo debido a la interacción entre los diversos componentes).

$$K_d = K_{dw} + K_{dDOC} + K_{dpig} + K_{dPM} + K_{dResidual}$$

2.2. REFLECTANCIA EN EL AGUA

La medida de la reflectividad de una masa de agua depende si nos podemos acerca a la superficie de agua lo suficiente como evitar medir una capa de aire o no, normalmente y debido a las embarcaciones utilizadas en el muestreo no es posible evitar una capa de aire entre el radiómetro y el agua. Para poder corregir este efecto de la capa de aire y medir la reflectividad de la masa del agua se adaptó la metodología de la NASA para estudios oceanográficos.

La reflectancia (o reflectividad) "remota" (R_{rs} , *remote sensing reflectance*) se define como el cociente entre la radiancia emergente del agua (L_w) y la irradiancia solar descendente (E_s). La radiancia se expresa en $W m^{-2} nm^{-1} sr^{-1}$, mientras que la irradiancia se expresa en $W m^{-2} nm^{-1}$, por lo que las unidades de R_{rs} son sr^{-1} . Sin embargo, fuera del ámbito oceanográfico, se utiliza la medida adimensional de la reflectividad, expresada como el cociente entre la radiancia del agua (L_w) y la radiancia del blanco de referencia (L_s). Si el blanco de referencia es un difusor *lambertiano*, $E_s = \pi * L_s$, podemos transformar esta medida adimensional, en una medida de R_{rs} .

Esta diferenciación es importante, ya que los modelos que ponen en relación la reflectancia del agua y sus propiedades ópticas inherentes consideran siempre la R_{rs} definida previamente, con unidades de sr^{-1} .

La radiancia se mide desde fuera del agua (L_{sfc}), una parte del flujo energético medido corresponde a radiancia emergente del agua (L_w), pero también hay una contribución de luz solar difusa (L_{sky}) que es reflejada por la superficie del agua. La fracción de luz difusa que es reflejada (ρ^*) depende del ángulo de observación, de los ángulos cenital y acimutal solar y de la velocidad del viento. En el caso de una superficie del agua totalmente plana, ρ^* equivale a la reflectividad de Fresnel.

$$L_{sfc}(\lambda, \theta, \Phi \in \Omega_{FOV}, \theta_o) = L_w(\lambda, \theta, \Phi \in \Omega_{FOV}, \theta_o) + \rho^* L_{sky}((\lambda, \theta', \Phi' \in \Omega'_{FOV}, \theta_o))$$

λ es la longitud de onda

θ es el ángulo cenital de observación para la medida de L_{sfc} , que normalmente se elige entre 30 y 50°. El ángulo recomendado en los protocolos de la NASA es 45°

θ' es el ángulo de medida de L_{sky} . Es el mismo que el de la medida de L_{sfc} (45°) pero en vez de medirse desde el cenit ("mirando de arriba abajo") se mide desde el nadir ("mirando de abajo a arriba")

Φ es el ángulo acimutal de observación para la medida de L_{sfc} . Es el ángulo acimutal con respecto a la posición del sol. Como veremos más adelante el ángulo recomendado por la NASA es de 135°

Φ' es el ángulo acimutal para la medida de L_{sky} . $\Phi' = \Phi$

Ω_{FOV} es el ángulo sólido que delimita el campo de visión (FOV) del radiómetro. La notación $\Phi \in \Omega_{FOV}$ indica que el FOV está centrado en torno al ángulo Φ

La ecuación anterior nos permite determinar L_w , que podemos simplificar como:

$$L_w = L_{sfc} - \rho * L_{sky}$$

Hay que medir la radiancia de la superficie del agua (L_{sfc}) y la del cielo (L_{sky}) y medir o estimar el factor ρ

La reflectividad remota medida desde fuera del agua será, por tanto:

$$R_{rs} = (L_{sfc} - \rho * L_{sky}) / E_s$$

Para determinar R_{rs} se puede medir L_{sfc} , L_{sky} y E_s con un radiómetro calibrado, o medir R_{sfc} y R_{sky} con un blanco de referencia lambertiano. Se optó por efectuar la medida de R con Spectralon por dos motivos fundamentales:

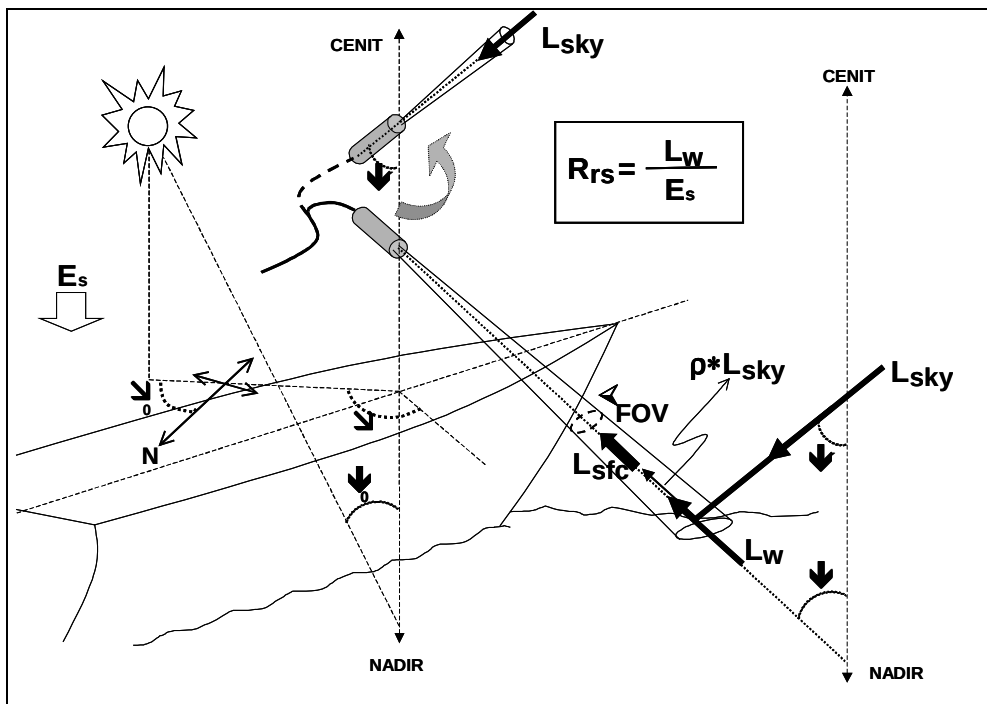
- Es más rápido ya que no requiere cambiar accesorios (FOV para radiancia y receptor coseno)
- La medida del receptor coseno tiene un error mayor que la medida a través del Spectralon según estudios realizados.
-

La R_{rs} se puede obtener a partir de medidas de reflectividad con el Spectralon:

$$\begin{aligned} R_{sfc} &= L_{sfc} / L_{sun} \\ R_{sky} &= L_{sky} / L_{sun} \\ E_s &= \pi * L_{sun} \end{aligned}$$

Por lo tanto la reflectividad remota corresponde a:

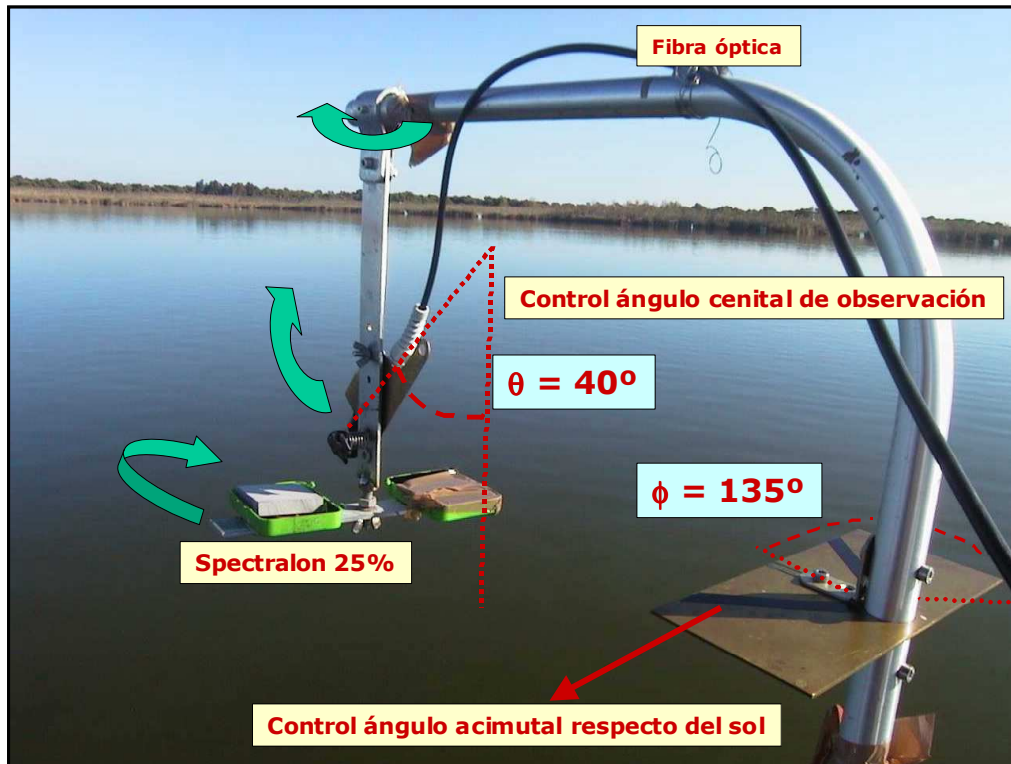
$$R_{rs} = (R_{sfc} - \rho R_{sky}) / \pi$$



Esquema general de medidas radiométricas

Para obtener el factor p es necesario medir la velocidad del viento (U , en m/s) y conocer los ángulos cenitales solar y de observación. Esos valores se introducen en *look-up tables* generadas a partir de un modelo de transferencia radiativa realizado por Mobley y se extraen los valores correspondientes de p en cada punto de muestreo.

Para conseguir medir en estos ángulos en la barca utilizada en el muestreo, fue preciso diseñar un dispositivo, que se ubicó en la proa de la embarcación con objeto de minimizar la influencia de luz reflejada por ésta.



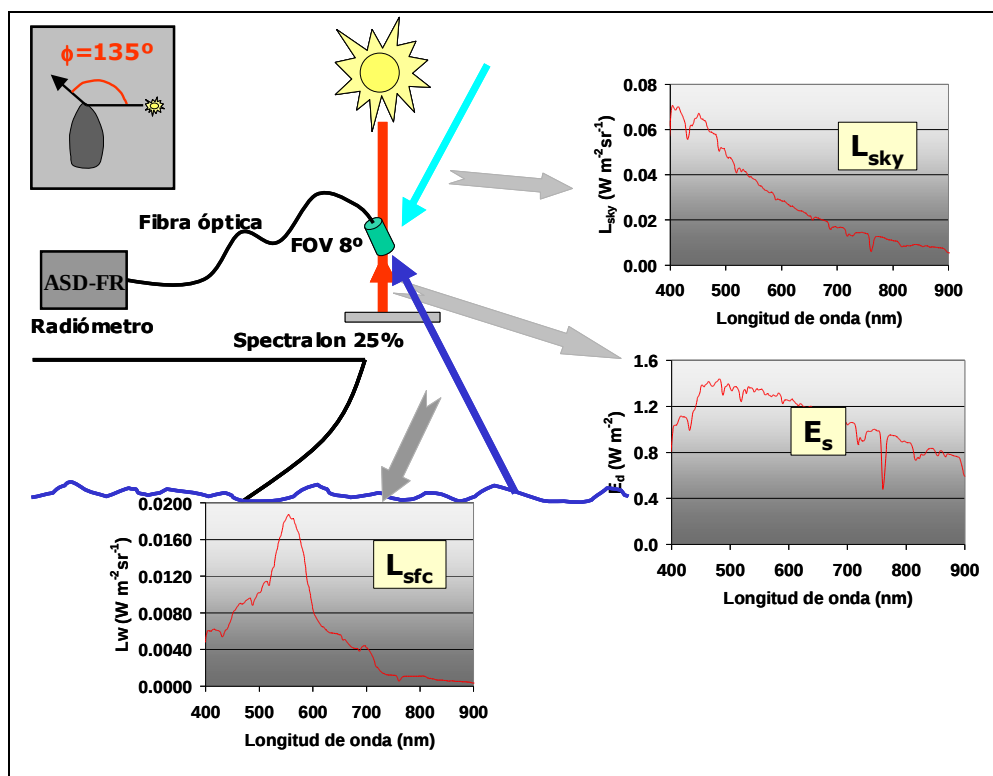
Dispositivo para medida de la reflectancia

El dispositivo permite controlar el ángulo acimutal mediante la proyección de la sombra de su eje sobre una pletina. El ángulo cenital se controla con otra pletina que pendula en el plano del eje de giro (lo que asegura su perpendicularidad respecto a la superficie del agua), y sobre la cual gira otra placa en la que va montada la lente del radiómetro. Tiene dos posiciones fijas a ángulos cenital y nadiral de 40° . De esta forma se mide la radiancia del agua (L_{sfc}) con $\theta = 40^\circ$ y la radiancia solar difusa (L_{sky}) con $\theta' = 40^\circ$. En cuanto a la medida de la irradiancia solar (E_s), una última pletina que gira perpendicular a la vertical, contiene un panel de referencia (*Spectralon*, con una reflectancia espectral calibrada del 25%).

El campo de visión (FOV) utilizado es de 8° , de acuerdo a los protocolos NASA. Para conseguirlo se usa una lente que se sitúa en el extremo de la fibra óptica que transporta la luz hasta los componentes ópticos del radiómetro de campo.

El dispositivo debe estar en la proa de la embarcación para evitar los reflejos del casco de la misma. Se efectúa la secuencia de las tres medidas necesarias para el

cálculo de R_{rs} (L_{sfc} , L_{sky} y E_s) en un tiempo inferior a un minuto, lo que asegura que las variaciones de iluminación sean casi despreciables, salvo en condiciones atmosféricas muy desfavorables. En la figura se muestra un resumen esquemático de la configuración empleada para la medida de la reflectancia, con ejemplos de los espectros de radiancia e irradiancia obtenidos.



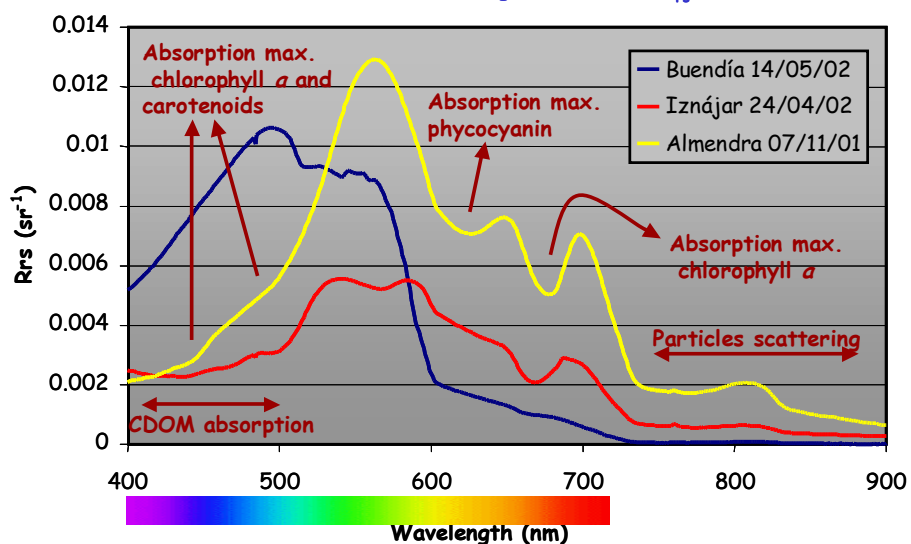
Configuración de la medida de la reflectancia (R_{rs})

El espectrorradiómetro utilizado, adquirido por el CEDEX, es un ASD-FR (*Analytical Spectral Devices Inc.*), cuyo intervalo espectral comprende las longitudes de onda desde 335 nm (en el ultravioleta cercano) hasta 2500 nm (en el infrarrojo medio). No obstante, y dado que el agua absorbe muy intensamente la luz infrarroja, el intervalo utilizado para el estudio de los embalses ha sido, normalmente, de 400 a 900 nm.

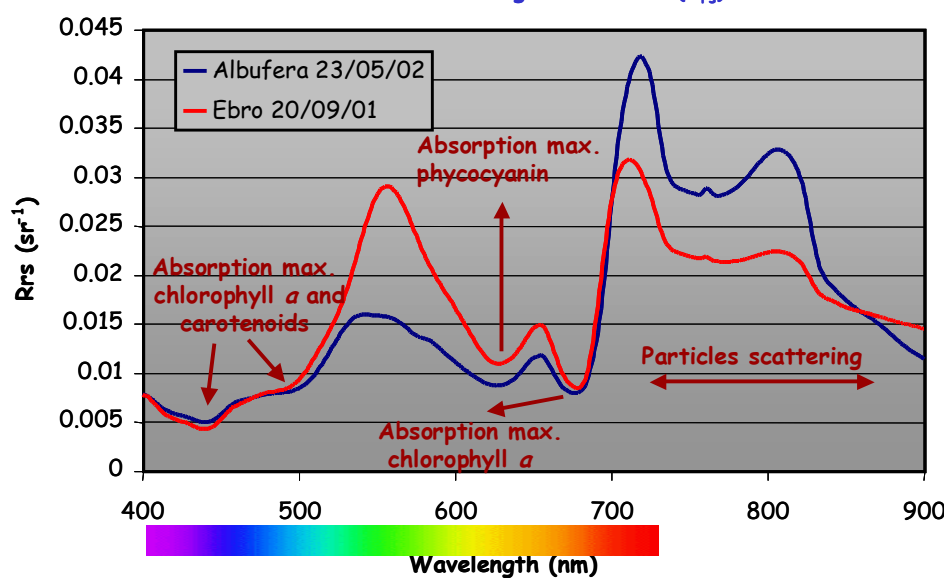
El dispositivo diseñado en el CEDEX, que denominamos el "niño" por su fragilidad y a la vez robustez es adaptable a cualquier embarcación, aunque siempre en los muestreos se busca la mejor dentro de las posibilidades existentes.



Remote Sensing Reflectance (R_{rs})



Remote Sensing Reflectance (R_{rs})



2.3. RELACIÓN ENTRE COEFICIENTE DE ATENUACIÓN Y REFLECTANCIA

La reflectividad de la superficie en la cual se observa el fondo viene determinada por:

$$R_{rs}(0^-, H) = R_{rs\infty}^- + (\rho - R_{rs\infty}^-) \cdot \exp[(k_d + k_u)H]$$

$R_{rs\infty}^-$ Reflectividad por debajo de la superficie sin observar el fondo
 ρ Albedo del fondo
 k_d Coeficiente de atenuación difusa descendente
 k_u Coeficiente de atenuación difusa ascendente
 H Profundidad

En el caso de $k_d = k_u$ o que solo se pueda medir k_d

La expresión para determinar la reflectividad del fondo se transforma en

$$R_b = R_{\infty} + (R - R_{\infty}) \cdot \exp[(2k_d)z_b]$$

R_b Reflectividad del fondo (bottom)
 R_{∞} Reflectividad por debajo de la superficie
 k_d Coeficiente de atenuación difusa
 z_b Profundidad

El segundo método utilizado por Diersen es la aplicación de la ley de Beers:

$$R_b = (R_{rs} Q_b / t) \cdot [\exp(-k_{Lu}(z_b - z_b)) / \exp(-k_d z_b)]$$

$Q_b = E_u / L_u$ en el fondo marino

t Transmisividad del agua

k_{Lu} Coeficiente de atenuación de la profundidad media de la radiancia ascendente.

Estudios analiza los 2 métodos comparándolos con datos de campo y ambos tienen un determinado error. Se presenta la disyuntiva de cuál de los 2 métodos utilizar en el presente estudio, ya que en ambos casos existen parámetros de los cuales no disponemos de datos.

Un estudio completo de la respuesta espectral del fondo y en la columna de agua requiere la instrumentación necesaria para medir u obtener de forma indirecta, a partir de medidas realizadas, los siguientes parámetros:

- Reflectividad medida desde fuera del agua (R^+)
- Reflectividad medida desde fuera del agua (R^-)
- Irradiancia descendente a diferentes profundidades, además de disponer de esta variable para medir Q , lo que nos permite obtener el coeficiente de atenuación difusa descendente.
- Irradiancia ascendente a diferentes profundidades, además de disponer de esta variable para medir Q , lo que nos permite obtener el coeficiente de atenuación difusa ascendente.
- Trasmisibilidad del agua.

Todas estas medidas se pueden medir u obtener de forma indirecta si se dispone de dos espectrorradiómetros con una fibra óptica larga; en teoría la longitud sería tal que nos permita llegar al fondo en todos los puntos de muestreo que midan simultáneamente la energía descendente y ascendente.

3. COMPORTAMIENTO DE LA ENERGIA EN EL AGUA: PROPIEDADES INHERENTES DEL AGUA

Los procesos de absorción del agua se cuantifican mediante el coeficiente de absorción (a). El coeficiente de absorción es la cantidad de luz absorbida cuando un estrecho haz de luz colimado monocromático atraviesa un pequeño volumen de agua.

Si el fotón es dispersado (no atrapado) continua su camino; este proceso se mide mediante el coeficiente de dispersión (b). El coeficiente de dispersión es la fracción de luz transmitida cuando un estrecho haz de luz colimado monocromático atraviesa un pequeño volumen de agua.

La energía incidente $\Phi_i(\lambda)$ es igual a la suma de la energía absorbida $\Phi_a(\lambda)$, transmitida $\Phi_t(\lambda)$ y dispersada $\Phi_s(\lambda)$

$$A(\lambda) = \Phi_a(\lambda) / \Phi_i(\lambda)$$

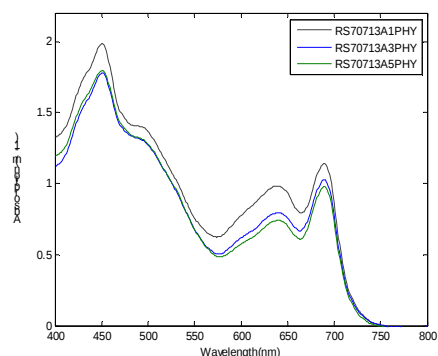
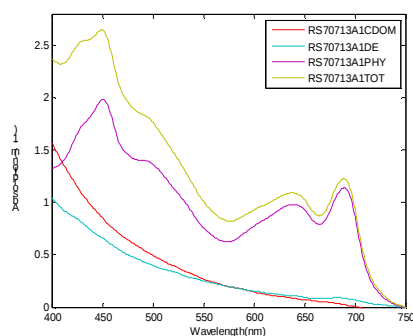
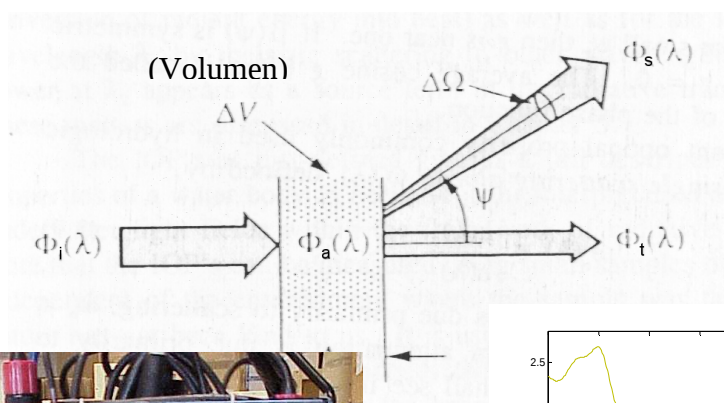
$$a(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{A(\lambda)}{\Delta r}$$

$$B(\lambda) = \Phi_s(\lambda) / \Phi_i(\lambda)$$

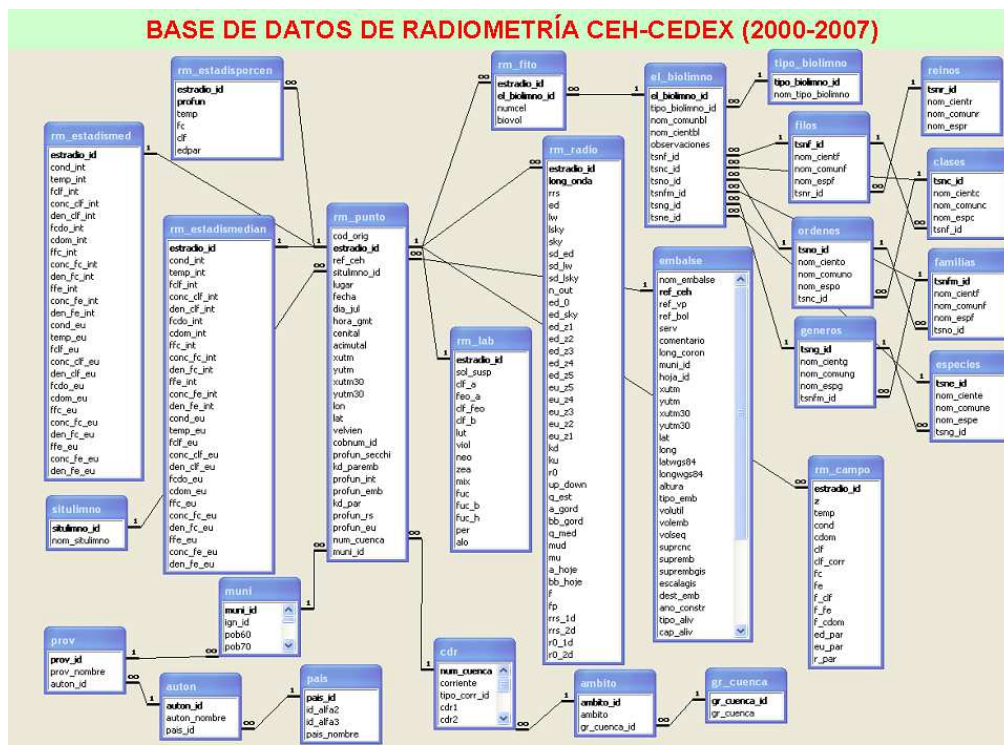
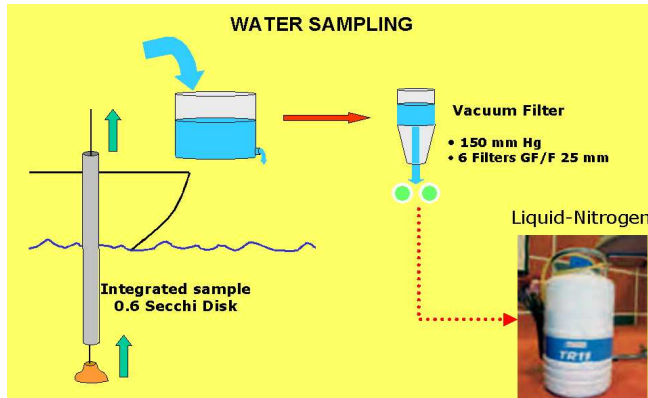
$$b(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{B(\lambda)}{\Delta r}$$

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$$

$c(\lambda)$ es el coeficiente de atenuación, es la atenuación que sufre la luz al atravesar un estrecho haz de luz colimado monocromático cuando atraviesa un pequeño volumen de agua



Simultáneamente a las medidas radiométricas se mide la transparencia mediante el disco de Secchi y se cogen muestras de agua para su análisis en el laboratorio, para determinar pigmentos fotosintéticos, sólidos en suspensión, fitoplancton, etc.



4. RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES DEL AGUA APARENTES E INHERENTES

Un modelo semi-empírico basado en los resultados de la simulación realizada con el método de Monte Carlo relacionan la reflectancia por debajo del agua en la superficie con los coeficientes de absorción y retrodispersión mediante la expresión:

$$R(0^-, \lambda) = (-0.629\mu_0 + 0.975) \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)},$$

5. APLICACIÓN DE LA RADIOMETRIA DE AGUA A LA TELEDETECCIÓN

Los datos de campo nos permite realizar modelos que muchas veces no son aplicables a la teledetección debido a que la corrección atmosférica no es buena para los bajos valores bajos de reflectividad de las masas de agua.

