

## APLICACIONES PRÁCTICAS DEL PRINCIPIO ERGÓDICO A LA CONDICION DE “LONGITUD DE MEZCLA” USANDO TRAZADOR: ANÁLISIS DE DOS CAUCES NATURALES EN COLOMBIA (RÍO PANCE Y RIO CALI).

### PRACTICAL APPLICATIONS OF ERGODIC PRINCIPLE TO “MIXING LENGTH” CONDITION USING TRACERS: ANALYSIS OF TWO NATURAL STREAMS IN COLOMBIA (PANCE AND CALI RIVERS).

Alfredo José Constain Aragón<sup>1</sup>

#### RESUMEN

En un artículo anterior para la Revista *Aqualac* (Constain, 2012), el autor ha presentado un nuevo método para verificar la distancia a la cual un soluto conservativo vertido en un flujo alcanza la “Mezcla completa”, o sea llena de manera uniforme el área de la sección transversal de la corriente. Como quiera que es interesante considerar más aplicaciones prácticas de este método, se presentan en detalle dos casos reales: Río Pance y Río Cali que son grandes ríos de montaña en el sur de Colombia. Este nuevo método tiene la ventaja de contar con una función determinista que indica cuando se cumple esta condición para el trazador considerado. Esta herramienta teórica puede ser de gran valor en los estudios de Calidad de Aguas en los que esta condición es de primordial importancia.

**Palabras clave:** Mezcla completa, trazadores conservativos, hidráulica fluvial, calidad de aguas

#### ABSTRACT

In a prior article in *Aqualac Journal* (Constain, 2012), the author has presented a new method to verify the distance in which a poured conservative solute reaches the “Complete mixing” condition, i.e.: it fills uniformly the cross section of current. Whereas that is interesting to consider more practical applications of this method, it is presented in detail two real cases: Pance River and Cali River which are two large mountain rivers in southern Colombia. This new method accounting as an advantage to have a deterministic function that indicates when it is accomplished this condition for considered tracer. This theoretical tool may be of great value for Water Quality studies in which this condition is of major importance.

**Key words:** Complete Mixing, conservative tracers, fluvial Hydraulics, Water quality.

#### ANTECEDENTES

De acuerdo con la literatura técnica corriente (French, 1986) (Holley, 1969) (Fischer, 1968) la ecuación conservativa elemental de balance de masa (1) debe representar apropiadamente el transporte dispersivo y advectivo en un flujo natural. En ella  $C$  es la concentración promedio en la sección transversal,  $U$  es

la velocidad media del fluido y  $E$  es el Coeficiente Longitudinal de Dispersion. Para establecerla se considera que el transporte difusivo vertical y transversal (en  $Z$  y en  $Y$ ) ya se ha cumplido y que un patrón inicial (cobertura parcial de la sección transversal por el soluto) Figura 1 A. se convierte en un patrón de cobertura total de tal sección. Figura 1 B.



Figura 1. A.- Zona limitada B.- Cobertura total

<sup>1</sup> Ingeniero, Gerente y Director I+D Hydrocloro Ltda, Bogotá DC, Colombia. alfredo.constain@gmail.com

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Esta ecuación (1) es la llamada relación básica de Taylor para la Advección-Dispersión (ADE) de un trazador conservativo (sin fuentes ni sumideros de masa). Como su nombre lo indica se considera explícitamente independientes los términos de advección (dependiente del movimiento macroscópico del flujo) y de dispersión (dependiente de las fluctuaciones). Su solución es la bien conocida función de Fick (2) que describe el comportamiento de la concentración promedio en el plano móvil asociado al centro de masa de la pluma, donde  $A$  es el área de la sección transversal del flujo y  $M$  es la masa de trazador vertida súbitamente.

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi t E}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Et}} \quad (2)$$

Estas dos expresiones básicas del transporte de masa, además de requerir que el trazador llene uniformemente la sección transversal implican que el coeficiente longitudinal de dispersión,  $E$ , sea constante para que el transporte dispersivo por fluctuaciones no dependa sino del gradiente de concentración (si  $E$  fuese una variable habría un factor extra de variación-diferente al gradiente mismo-). Esta consideración lleva a imponer la condición adicional de flujo uniforme, para el cual  $E$  es constante.

### UN MODELO ALTERNO QUE DESCRIBE LAS CURVAS REALES DE TRAZADOR A PARTIR DE UN CONCEPTO NO ESTACIONARIO DEL PROCESO.

En un artículo previo del autor mostro que para garantizar el cumplimiento de las ecuaciones básicas no es necesario imponer estas condiciones tan restrictivas y que por el contrario un coeficiente de transporte función del tiempo es apropiado para que los modelos teóricos se acoplen a las curvas experimentales, ya que debe incorporarse en la descripción la posibilidad de más de un sistema inercial mediante esta ampliación de la naturaleza de  $E$ . Esto implica definir una velocidad media del flujo con la siguiente forma (Constain, Lemos y Carvajal 2002):

$$U = \frac{1}{f(t)} \sqrt{\frac{2E(t)}{t}} \quad (3)$$

Aquí  $\tau$  es el tiempo característico de dispersión y  $\Phi(t)$  es una función que describe el grado de asimetría de la curva de concentración. La función  $\Phi(t)$  que aparece en esta ecuación es en realidad una función

de estado y por lo tanto da cuenta de la evolución termodinámica de la pluma de soluto.

### NATURALEZA DE LA FUNCION $\Phi(X)$ .

Llama la atención la función  $\Phi(t)$  en tanto que ella defina la asimetría de la curva de trazador como se ha establecido antes. Un primer aspecto a tener en cuenta es que en realidad su definición primordial tiene que ver con ser la razón entre velocidad de dispersión longitudinal,  $V_{disp}$ , y la velocidad advectiva,  $U$ .

$$f(t) = \frac{V_{disp}}{U} \quad (4)$$

Esto se cumple si la velocidad de dispersión tiene una forma Gaussiana mono-dimensional, tal como postuló Taylor inicialmente (y por lo tanto cumpliendo con la ecuación de Fick). Se puede definir esta velocidad en función de un desplazamiento,  $\Delta$  y un tiempo  $\tau$  característicos de la siguiente forma:

$$V_{disp} = \frac{\Delta}{t} = \frac{\sqrt{2Et}}{t} = \sqrt{\frac{2E}{t}} \quad (5)$$

Como se observa repetidamente la dispersión- y por lo tanto su velocidad- dependen grandemente de lo que ocurra en el eje transversal (a lo ancho del flujo). (Constain, Lemos y Carvajal, 2003) Entonces, si el transporte transversal se va extinguiendo paulatinamente, el efecto cortante sobre una distribución aleatoria de partículas de soluto en el campo de velocidades del flujo irá atenuándose en el tiempo. Por lo tanto la velocidad de dispersión deberá ir disminuyendo necesariamente con el tiempo, es decir es un evento asociado al devenir unidimensional de la flecha del tiempo. Si se toman  $V_{disp}$  y  $U$  como velocidades inerciales que son compuestas por un observador euleriano fijo al borde del flujo, esta composición de Galileo llevará a que se produzca una *asimetría* en la forma de la curva de trazador, que es lo que experimentalmente se observa. Naturalmente este es un efecto puramente cinemático (correspondiente en este caso al observador euleriano) y no un efecto real de almacenamiento temporal de las partículas de trazador en zonas periféricas ("zonas muertas") (Constain, 2012).

En segundo lugar, la creación de la velocidad de dispersión,  $V_{disp}$ , se puede ver como un mecanismo de reacción del tipo Le Chatelier a la inyección súbita y perturbadora de una masa de trazador al flujo. Por lo tanto esta velocidad irá a tomar valores compatibles con el desarrollo de la creación de entropía interna y su expulsión al medio ambiente, es por lo tanto una función de estado.

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA DE CÁLCULO DEL TRANSPORTE CON BASE EN UNA VISION FUNCION DEL TIEMPO PARA LOS PARAMETROS DE TRANSPORTE.**

**Cálculo del Coeficiente longitudinal de dispersión:**

Para desarrollar una metodología específica a partir de estas ideas nuevas interesa en primer lugar despejar el Coeficiente  $E$ . Se puede demostrar que la relación que existe entre  $\tau$  como tiempo característico y  $t$  como tiempo general (variable independiente) está determinada por la distribución de Poisson aplicada al movimiento totalmente aleatorio (estadístico) de las partículas del trazador. (Constain, Lemos y Carvajal, 2006) Esta relación numérica es:

$$\frac{t}{\tau} = b \approx 0.215 \tag{6}$$

Por lo tanto despejando  $E$  en la ecuación (3) queda:

$$E = \frac{f^2 U^2 b t}{2} \tag{7}$$

**Cálculos prácticos de  $U$  y  $\phi$ :**

En la práctica, tanto  $U$  como  $\phi$  y la misma  $t$  se miden en la curva de soluto en examen, conociendo la distancia desde el punto de inyección súbita y el punto de medición fijo en la orilla y estableciendo el tiempo transcurrido entre estos dos eventos. En la Figura 2 se muestra una pantalla de un instrumento de software útil para medición y análisis de cauces con el tiempo como abscisa ( $T=segundos$ ) y la conductividad específica como ordenada ( $C=uS/cm$ ).

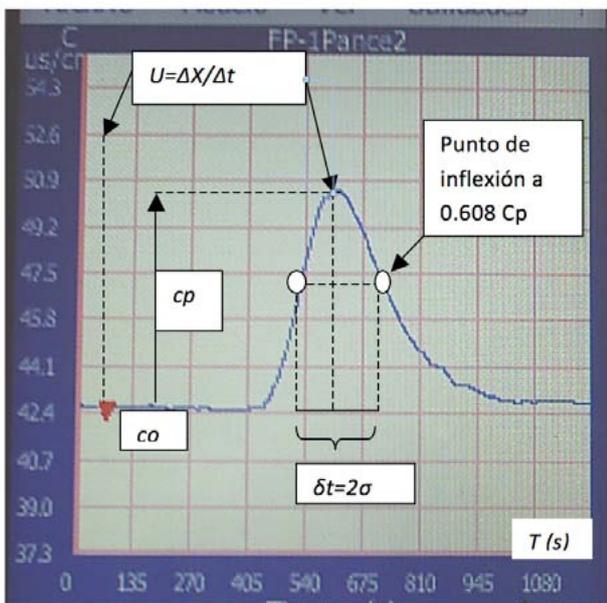


Figura 2. Medición práctica de  $U$  y  $\phi$  a partir de los datos de la curva de trazador

En esta pantalla se muestra el instante de inyección súbita de una masa determinada de trazador mediante una pequeña flecha roja. La curva de trazador (sal común en el caso mostrado) se sobrepone en una conductividad específica de fondo  $co$ , correspondiente al aporte iónico del lecho y la escorrentía. La Conductividad específica  $cp$  es la “altura” de la curva desde la base ( $co$ ) hasta el pico. La velocidad promedio del flujo  $U$  se calcula entonces por la razón entre la distancia  $\Delta X$  (dato conocido de entrada) y el tiempo entre la flecha roja y el pico de la curva.

$$U = \frac{\Delta X}{\Delta t} \tag{8}$$

En la misma Figura 2 se hacen los cálculos para la función  $\phi$ . De la teoría Fickiana básica y de la definición temporal para  $E$  se tiene que:

$$dt = 2s = 2\sqrt{b} f t \tag{9}$$

Por lo tanto  $\phi$  se calcula a partir de la siguiente fórmula con todos los datos conocidos, ya que  $\delta t$  y  $t$  se miden en la curva y  $\beta \approx 0.215$ :

$$f(t) = \frac{dt}{2 t \sqrt{b}} \tag{10}$$

Esta definición es importante pues permite calcular de manera práctica la función de asimetría en cada punto de la propagación de la pluma de trazador, a partir de mediciones temporales fáciles de realizar sobre la curva de concentración.

**REDEFINICION DE LA FUNCION DE FICK Y CÁLCULO DEL CAUDAL**

Si se parte de la ecuación (3) y se reemplaza en la ecuación clásica de Fick (2) se llega a una nueva relación para la concentración del soluto en función del tiempo. Aquí el sumando  $Co$  es la concentración salina de fondo del cauce considerado. El caudal  $Q$  aparece por cuanto en la expresión final del denominador aparece el producto área por velocidad ( $U \times A$ ).

$$C(t) = \frac{M}{Q \times \phi \times t \times \sqrt{2\pi\beta}} e^{-\frac{(X-Ut)^2}{2\beta\phi^2 U^2 t^2}} + Co \tag{11}$$

Esta ecuación que resulta de definir al Coeficiente Longitudinal de dispersión como función del tiempo, y por lo tanto acoplado a la realidad bidimensional del proceso de transporte difusión-dispersión, representa de forma muy precisa las curvas experimentales de trazador, a diferencia de la ecuación clásica, como ya se ha señalado. También, a partir de la ecuación modificada de Fick anterior se puede expresar el valor del caudal, según la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{M}{C_p \phi t \sqrt{2\pi\beta}} \quad (12)$$

Esta expresión es interesante por cuanto evidencia que el caudal (dato hidráulico primordial) es un parámetro *interno* del método propuesto y por lo tanto con una obligación directa de ser congruente con los demás datos. En las metodologías corrientes de transporte de masa, el caudal es un dato *externo* y por lo tanto sin un encadenamiento directo con los datos propios de los modelos convencionales.

### LA FUNCION $\Phi(x)$ , MEZCLA COMPLETA, EQUILIBRIO Y PRINCIPIO ERGODICO

Al ser  $\Phi(t)$  una función de estado necesariamente es sensible a las modificaciones o cambios que haya con respecto al número de grados de libertad del sistema. Por lo tanto es de esperar que cuando el transporte transversal por gradiente de concentración se atenúe y desaparezca, la función de asimetría  $\Phi(t)$  tome un valor especial que refleje ese hecho notable. Según fue explicado detalladamente en un trabajo anterior del autor (Constain, 2012), el valor que toma esta función recién se cumple que la sustancia trazadora llena uniformemente la sección transversal- para un tiempo  $t_0$ - es:

$$\phi(t_0) \approx 0.38 \quad (13)$$

Aunque estrictamente el equilibrio es un concepto volumétrico, para este caso se puede considerar sin un error significativo que a lo largo del eje transversal (a lo ancho), aproximadamente vale el equilibrio químico, y si es un sistema físico usual a nivel humano con características isobáricas e isotérmicas, vale también asintóticamente el equilibrio termodinámico. (Prigogine y Kondepudi, 1998) Por lo tanto, en estas condiciones se puede aplicar el teorema ergodico introducido originalmente por L. Boltzmann como la igualdad de promedios espaciales en un instante y promedios temporales en un punto (Lande, 1968); reinterpretado para el caso de las concentraciones de trazador se hacen convergentes la colección de un solo valor de concentración tomado en diversos valores del argumento; y diversos valores de concentración para un solo valor del argumento. En esencia se puede establecer que, de acuerdo a lo anteriormente expuesto, cuando cesa el transporte transversal por gradiente de concentración, las concentraciones a lo ancho de la pluma (diversos valores para un mismo argumento) son aproximadamente convergentes con las concentración a lo largo (colección de valores para diversos para diversos). La primera concentración media se llama  $C_v$  y la segunda  $C_y$ .

$$\frac{M}{Q \phi t_0} \approx 0.441 C_p \quad (14)$$

El miembro de la izquierda es la concentración volumétrica mientras que el miembro de la derecha es la concentración a lo ancho. La determinación de cuando un soluto ha llenado uniformemente la sección transversal del flujo en el cual evoluciona es de vital importancia por dos razones principalmente: Una de carácter ambiental que tiene que ver con la clasificación de los cauces naturales para absorber o disipar las contaminaciones que lo impactan. Un flujo con una gran "Longitud de mezcla" (o sea la distancia a la cual se consigue "Mezcla completa") se verá más en peligro que otro que tenga esta longitud mucho más corta. Otra de carácter hidráulico que indica que la medición de caudal con trazadores será precisa solo cuando el trazador haya ocupado todo el volumen de flujo por el cual evoluciona; es decir, cuando el trazador alcanza "Mezcla completa". Datos del caudal con anterioridad a esta distancia estarán afectados de errores con diversa magnitud y sentido (Constain, Lemos y Carvajal, 2005).

### APLICACIÓN DEL CRITERIO DE MEZCLA COMPLETA A VARIOS PROCESOS REALES DE EVOLUCION DE TRAZADOR.

Para ilustrar como se aplica la definición anterior para "Mezcla completa" es útil para varios propósitos prácticos en la técnica de trazadores, como se verá en seguida.

#### Analisis de una experimentación con trazador salino (NaCl) realizada con el equipo INIRIDA DEEP FLOW en el sur de Colombia (Rio Pance).

El Río Pance tiene las siguientes características:

Ubicación: Cali (Colombia), zona de los cerros occidentales

Tipo de cauce: Gran rio de montaña de gran pendiente, relativamente poco contaminado en el sitio de la medición.

Características hidráulicas: Gran caudal, velocidad significativa

Características de transporte de masa: Muy alta rugosidad superficial, inexistencia de piscinas.

Enseguida se muestran fotos del cauce y del equipo de medición a 400 metros del vertimiento. Figura 3.

#### Información grafica de los experimentos:

La gran ventaja para las mediciones es que se dispone de un equipo especial que trabaja un software (Inirida Deep Flow) en tiempo real. Este equipo cuenta con una pantalla que muestra la curva real de trazador y luego superpuesta la modelación teórica usando la ecuación (11). Además aparecen otras in-



Figura 3. Aspectos del Rio Pance y del instrumento de medición

formaciones como el cálculo del caudal usando la ley de conservación de la masa (con la integral bajo la curva). También se muestran datos numéricos como

$U$ ,  $Q$  y  $\Phi$  entre otros. Se realizaron dos vertimientos con sal que se detallan en seguida.

**Vertimiento 1 (X=400 m, M= 6 Kg). Figura 4**

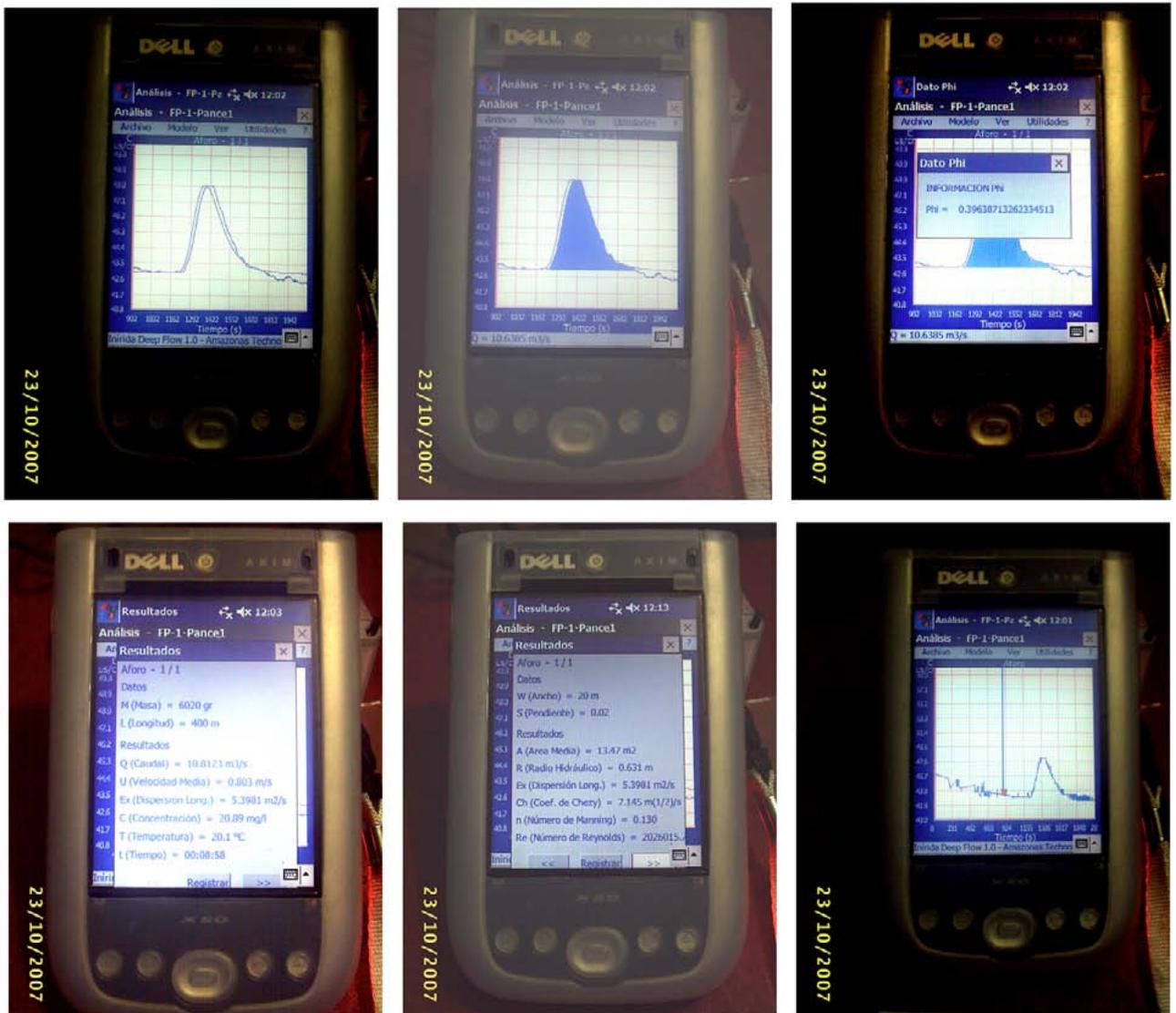


Figura 4. Pantallas del instrumento con datos gráficos y numéricos del 1er vertimiento

Vertimiento 2 (X=400 m, M=9 Kg). Figura 5.

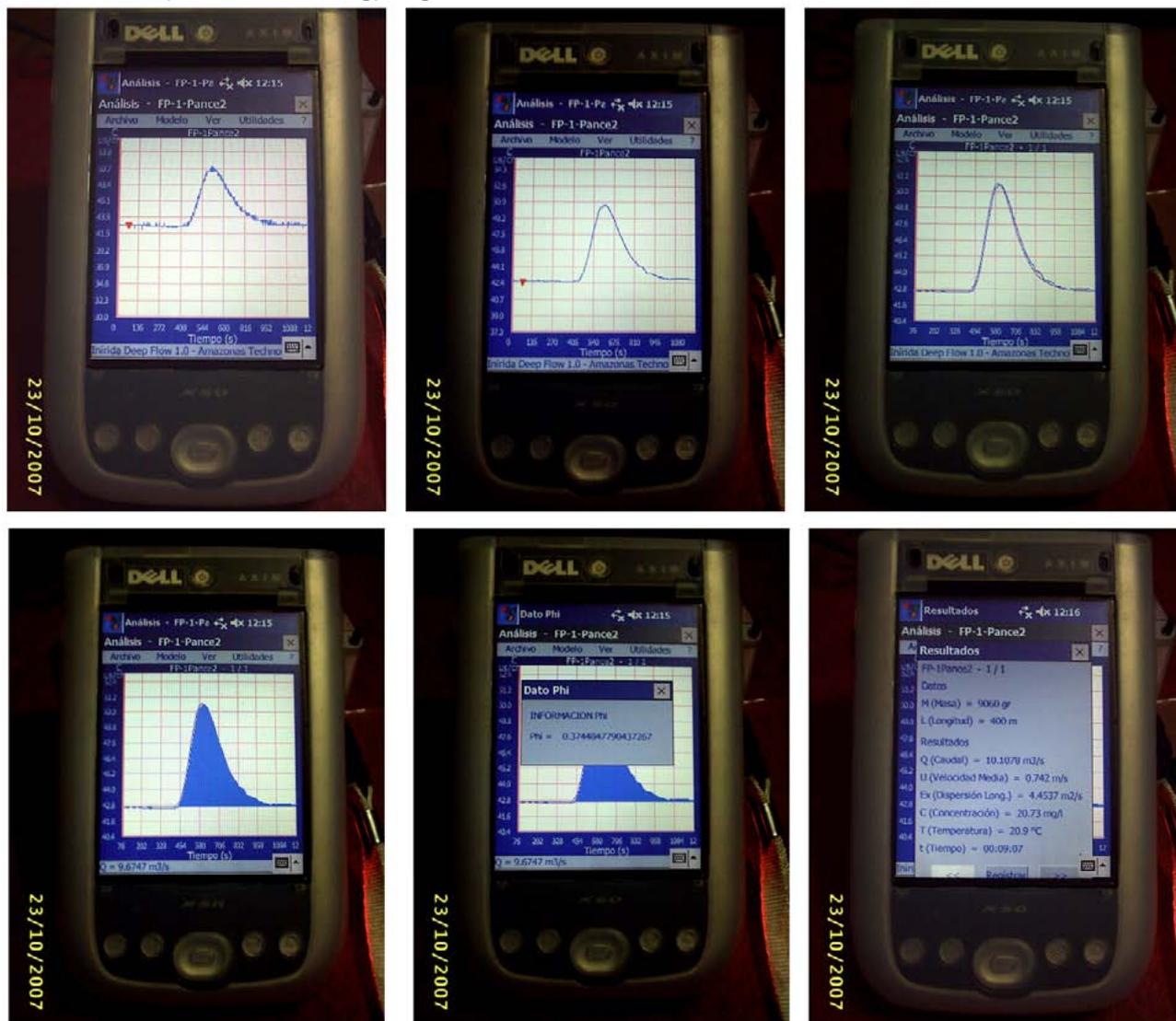


Figura 5. Pantallas del instrumento con datos gráficos y numéricos del 2o vertimiento

### Cuadro de resultados numéricos.

El siguiente cuadro condensa las informaciones recogidas por el IDF en cada medición sobre el cauce en Sistema Internacional, utilizando unidades prácticas donde se marca (\*):

Vertimiento	Ancho, W M	Distancia, X M	Masa, M K	Velocidad Media, Ux M/s	$\Phi$	Caudal, Q M3/s	Caudal, Qa (área bajo la curva) M3/s	Cp, Concentración pico Mgr/l(*)	to Tiempo S
1°.	20	400	6.020	0.803	0.396	10.8	10.6	2.64	498
2°.	20	400	9.060	0.742	0.374	10.1	9.7	3.88	539
Promedio	20	400	-----	0.773	0.385	10.5	10.2	-----	-----

(\*) Como se ve en la foto el dato original viene en conductividad específica. Se establece que la razón entre este parámetro en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y concentración de soluto salino (NaCl) en miligramos/litro a  $25^\circ\text{C}$  es de 2.08

### Análisis de los datos.

Enseguida se analizan los datos de cada uno de los vertimientos desde el punto de vista de las nuevas ecuaciones que soportan el IDF.

**Primer vertimiento:**

Se tiene un  $\Phi = 0.396$  o sea prácticamente en “Longitud de mezcla” (exactamente esto ocurre en  $\Phi = 0.38$ ) por lo tanto  $Lm = 400\text{ m}$  en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador). Ahora bien, la condición de “mezcla completa” está acompañada de la convergencia de dos concentraciones promedias, Concentración volumétrica promedio y Concentración transversal promedio, de acuerdo con el Principio ergodico para distribuciones normales.

Para los datos del vertimiento No. 1 se tiene que:

$$\overline{C_v} = \frac{M}{Q \times t_o} = \frac{6020}{10800 \times 498} \approx 1.12 \text{ mgr/l}$$

$$\overline{C_y} = 0.441 \times C_p = 0.441 \times 2.64 \approx 1.16 \text{ mgr/l}$$

En este caso el principio ergodico  $C_v \rightarrow C_y$  se realiza con una aproximación del 4%

**Segundo vertimiento:**

Se tiene un  $\Phi = 0.374$  o sea prácticamente en “Longitud de mezcla” (exactamente esto ocurre en  $\Phi = 0.38$ ) por lo tanto  $Lm = 400\text{ m}$  en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador). Se repiten las consideraciones anteriores:

Para los datos del vertimiento No.2 se tiene que:

$$\overline{C_v} = \frac{M}{Q \times t_o} = \frac{9060}{10110 \times 539} \approx 1.66 \text{ mgr/l}$$

$$\overline{C_y} = 0.441 \times C_p = 0.441 \times 4.04 \approx 1.78 \text{ mgr/l}$$

En este caso el principio ergodico  $C_v \rightarrow C_y$  se cumple con una aproximación del 7%

**Análisis de una experimentación con trazador fluorimetrico (RWT) realizada con el equipo INIRIDA DEEP FLOW en el sur de Colombia (Rio Cali).**

El Río Pance tiene las siguientes características:

Ubicación: Cali (V), zona occidental y central de la ciudad.

Tipo de cauce: Cauce de montaña de cierta pendiente, cauce contaminado en el sitio de la medición.

Características hidráulicas: Gran caudal, velocidad significativa

Características de transporte de masa: Rugosidad superficial media, existencia de piscinas

En seguida se muestran fotos del cauce y del experimento con Rodamina WT. Figura 6.

**Información gráfica de los experimentos:**

El equipo especial (Inirida Deep Flow) opera simultáneamente con dos sensores: de conductividad y de fluorescencia. En este caso. Se realizaron tres vertimientos de Rodamina WT que se detallan en seguida.



Figura 6. Aspectos del equipo de medición y del vertimiento del trazador

**Vertimiento 1 (M= 10 g, X=613 m). Figura 7**

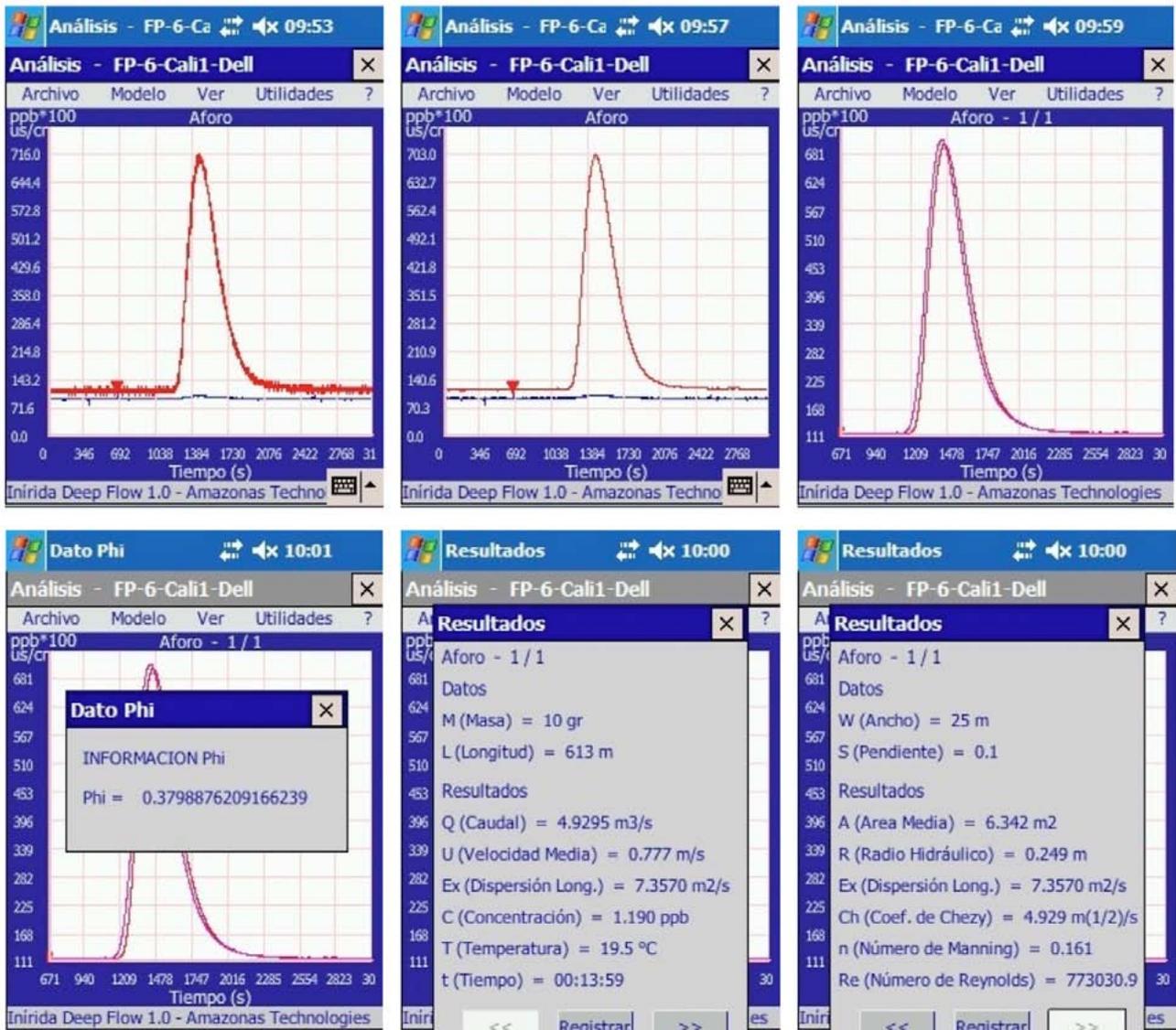


Figura 7. Pantallas con información grafica y numérica Primer vertimiento

**Vertimiento 2 con Rodamina WT ( M=4 g a X= 613 m) Figura 8**

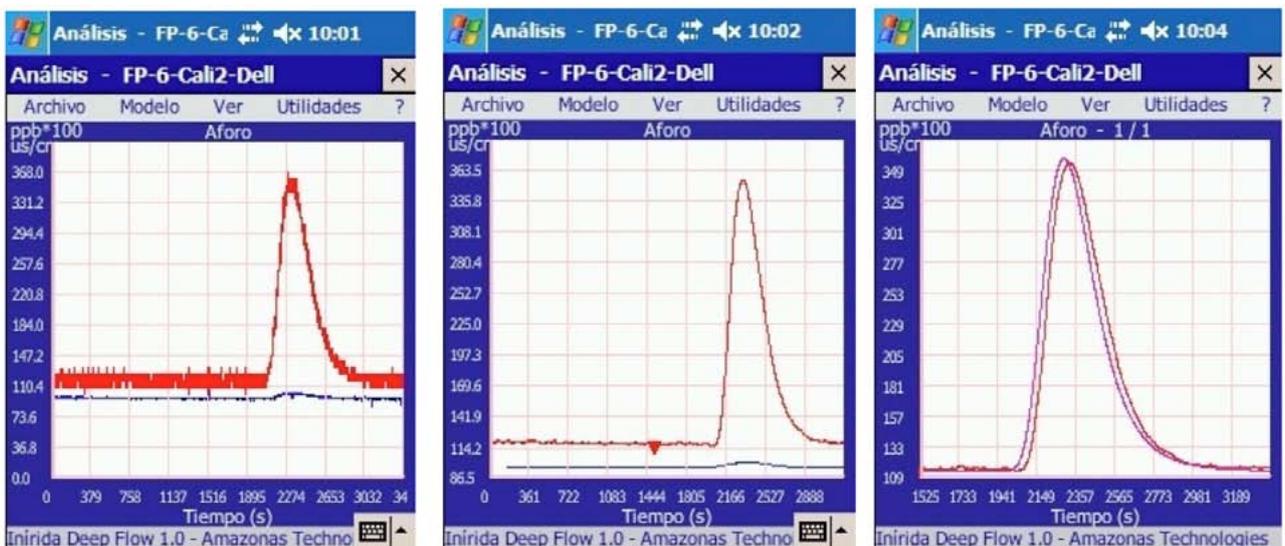


Figura 8. Pantallas con información grafica y numérica segundo vertimiento (parte A)



Figura 8. Pantallas con información grafica y numérica segundo vertimiento (parte B)

**Vertimiento 3 con Rodamina WT (M=4 g a X= 613 m) Figura 9**

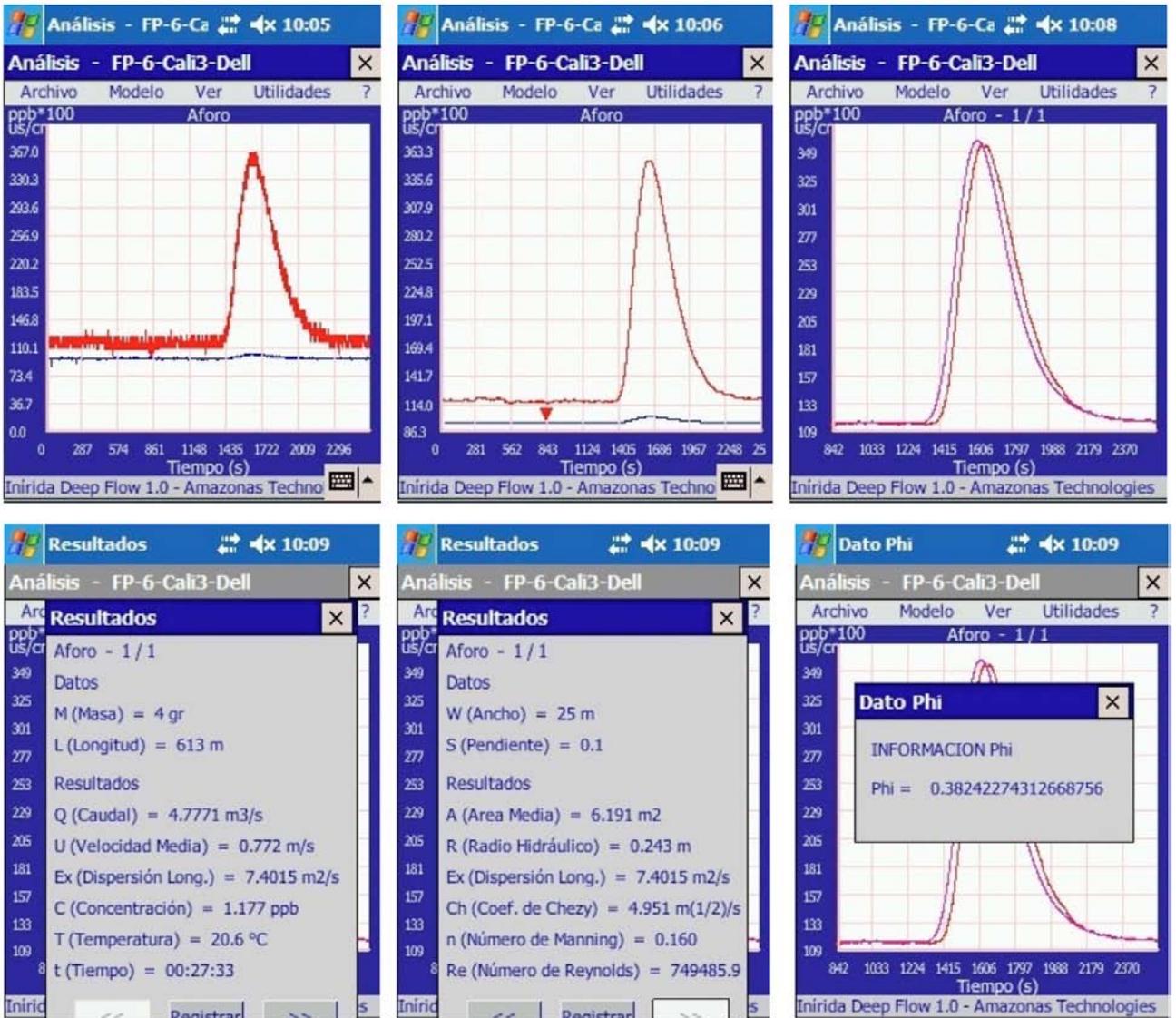


Figura 9. Pantallas con información grafica y numérica Tercer vertimiento

### Cuadro de datos numéricos.

El siguiente cuadro condensa las informaciones recogidas por el IDF para las tres mediciones en el cauce en Sistema Internacional, utilizando unidades practicas donde se marca (\*).

Vertimiento	Ancho, W M	Distan- cia, X M	Masa, M G	Velocidad Media, Ux M/s	$\Phi$	Caudal Q M3/s	Caudal Qa (área bajo la curva) M3/s	Cp, Con- centración pico Ppb (*)	Tiempo to S
1.- Rodamina WT	25	613	10	0.78	0.38	4.93	NA	608.6	786
2.- Rodamina WT	25	613	4	0.77	0.38	4.75	NA	248.0	796
3.- Rodamina WT	25	613	4	0.77	0.38	4.77	NA	243.8	796
Promedio	25	613	---	0.76	0.38	----	----	----	793

(\*) Este dato en PPB está en grilla del instrumento multiplicado por 100 por lo tanto el valor real es cien veces menor

### Análisis de los datos.

#### Primer vertimiento (10 g a 613 m)

Se tiene un  $\Phi = 0.38$  o sea que se está en "Longitud de mezcla" (exactamente esto ocurre en  $\Phi = 0.38$ ) por lo tanto  $Lm = 613 m$  en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador. Por lo tanto:

$$\bar{C}_v = \frac{M}{Q \times t_o} \approx \frac{10}{4930 \times 786} \approx 2.58 \text{ ppb}$$

Y teniendo en cuenta que la grilla muestra *ppb* multiplicados por 100, se debe dividir por esa cifra para obtener el dato correcto

$$\bar{C}_y = 0.441 \times Cp_{Lm} \times \frac{1}{100} \approx 0.441 \times 608.6 \times \frac{1}{100} \approx 2.68 \text{ ppb}$$

Y por lo tanto se cumple bien el principio ergódico  $C_v \rightarrow C_y$  para este caso con un error relativo del 4%:

#### Segundo vertimiento (M=4 g a X=613 m)

Se tiene un  $\Phi = 0.38$  o sea que se está en "Longitud de mezcla" (exactamente esto ocurre en  $\Phi = 0.38$ ) por lo tanto  $Lm = 613 m$  en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador. Por lo tanto:

$$\bar{C}_v = \frac{M}{Q \times t_o} \approx \frac{4}{4750 \times 796} \approx 1.06 \text{ ppb},$$

Y teniendo en cuenta que la grilla muestra *ppb* multiplicados por 100, se debe dividir por esta cifra para obtener el dato correcto

$$\bar{C}_y = 0.441 \times Cp_{Lm} \times \frac{1}{100} \approx 0.441 \times 248 \times \frac{1}{100} \approx 1.09 \text{ ppb}$$

Y por lo tanto se cumple bien el principio ergódico  $C_v \rightarrow C_y$  para este caso con un error relativo del 3%:

#### Tercer vertimiento (M=4 g a X=613 m)

Se tiene un  $\Phi = 0.38$  o sea que se está en "Longitud de mezcla" (exactamente esto ocurre en  $\Phi = 0.38$ ) por lo tanto  $Lm = 613 m$  en este caso (para estas condiciones de caudal, de rugosidad y de masa de trazador. Por lo tanto:

$$\bar{C}_v = \frac{M}{Q \times t_o} \approx \frac{4}{4770 \times 796} \approx 1.05 \text{ ppb}$$

Y teniendo en cuenta que la grilla muestra *ppb* multiplicados por 100, se debe dividir por esta cifra para obtener el dato correcto

$$\bar{C}_y = 0.441 \times Cp_{Lm} \times \frac{1}{100} \approx 0.441 \times 248.8 \times \frac{1}{100} \approx 1.10 \text{ ppb}$$

Y por lo tanto se cumple bien el principio ergódico  $C_v \rightarrow C_y$  para este caso con un error relativo del 5%.

### CONCLUSIONES

1. La aplicación del principio ergódico en ambos tipos de trazador fue satisfactorio, y es claro que este criterio puede ser muy útil en el mo-

- mento de saber la información de la "Longitud de mezcla".
2. Este criterio es muy práctico y eficiente en el momento de realizar evaluaciones de calidad de aguas en los cauces naturales. .
  3. La metodología presentada se acopla muy bien a los datos experimentales, propiciando un análisis realista de los verdaderos mecanismos que condicionan el transporte de masa en los cauces naturales.
  4. Para facilitar la toma de información experimental se usa un equipo software-hardware (IDF) que opera en tiempo real, permitiendo una gran capacidad operativa a los grupos de trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

- Constain A. 2012. Verification of Ergodic Principle for a dispersion process in flow. Aceptado Revista Aqualac, Montevideo, UNESCO.
- Constain, A., Carvajal. A., Carvajal, J., Lemos R. 2005. Nuevo método de cálculo de la Longitud de mezcla en cauces naturales usando trazadores conservativos. Revista Ingeniería del Agua, España, Vol.13 , No.3
- Constain A., Carvajal R., 2007. Accurate measurements of discharge using tracers, FLUCOME 9, University of Florida, Tallahassee. USA.
- Constain A. Carvajal. A., Lemos R. 2002. Applications of a non-uniform flow velocity in streams, River Flow 2002. Lovain- La-Neuve, Vol 1. 135-141
- Constain A.; Lemos R.; 2003. Carvajal A., "Tecnología IMHE: Nuevos desarrollos en la hidráulica". Revista Ingeniería Civil, CEDEX, Vol 129,
- Constain A., Carvajal. A., Lemos R. 2006. Determinación teórica del Coeficiente de tiempos  $\beta$  en la ecuación de velocidad de flujo no uniforme en cauces naturales, XII Congreso de Ingeniería Mecánica de Chile, Universidad de Talca, No.42
- Fischer H.B. 1968. Dispersion predictions in natural streams. Journal of the Sanitary Engineering Division. ASCE Proceedings, October. pp 927-943.
- French, R., 1986., Open Channel hydraulics, Mc Graw-Hill, New York, 461-507 N.Y.,
- Holley E.R. 1969. Unified view of diffusion and dispersion. Journal of Hydraulics Division, ASCE proceedings, March, pp 621-631.
- Lande A., 1968. Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica. Editorial Tecnos. Madrid.
- Prigogine I.; 1998. Kondepudi D.; Modern Thermodynamics. Wiley, New York,