

Equivalencia de tasas de transporte de masa en los cauces naturales bajo la condición de “equilibrio dinámico”: un nuevo método de estudio de sus características mediante trazadores

Equivalence of mass transport rates in natural streams under the “dynamic equilibrium” condition: a new study method of its characteristics by means of tracers

Alfredo José Constaín Aragón ^{1*} y Jorge Luis Corredor Rivera²

Palabras clave

estudios de calidad de aguas;
hidráulica;
dispersión;
geomorfología;

Resumen

Desde mediados del siglo pasado, investigadores como Luna B. Leopold (y otros del USGS) en los Estados Unidos desarrollaron el concepto de “equilibrio dinámico”, que relaciona la geomorfología de los cauces naturales con parámetros básicos del flujo. En este artículo se explora en detalle esta condición, especialmente a partir de un nuevo enfoque del “acoplamiento”, usando trazadores, de las características *locales* del flujo con las condiciones *generales* del mismo. Este acoplamiento especial es posible gracias a que, en estado estacionario, existe una equivalencia entre tasas de transporte de masa locales y generales, que no ha sido advertida hasta ahora. Para ilustrar la técnica, se estudia experimentalmente su aplicación a un gran cauce de montaña en Colombia.

Keywords

water quality studies;
hydraulics; dispersion;
geomorphology;

Abstract

Since the mid-20th century, researchers such as Luna B. Leopold -and others from USGS- in USA have developed the concept of “dynamic equilibrium”, which relates geomorphology of natural streams to basic parameters of flow. This article seeks to examine these phenomena, mainly after the adoption of a new approach to “coupling”, by using traces, of local characteristics of flow and general conditions thereof. This special coupling is possible because, in steady state, there is an equivalence between local and general mass transport rates, which has not been noticed until now. To illustrate this technique, it is studied experimentally its application to a large mountain river in Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace tiempos sin memoria el hombre ha observado los fenómenos que ocurren en los cuerpos de agua, como parte de su ritual de curiosidad y respeto por lo que más lo inflencia y le importa. Un hecho observado en estos procesos fluviales ha sido el que existe una relación evidente entre las fuerzas que tallan los cursos naturales de agua y la forma y las proporciones de los lechos de los mismos. Así por ejemplo en un cauce estrecho la fuerza del agua tallará preponderantemente las paredes laterales (A), tratando de ganar más ancho; por otro lado en cauces anchos, esta fuerza tenderá a profundizar el cauce (B). De esta forma los procesos de “tallaje” en un sentido u otro tenderán a equilibrarse dinámicamente en un cierto punto (C) (figura 1).

El “equilibrio dinámico” ocurre entonces cuando la sección transversal del cauce logra un valor tal que las fuerzas de “tallaje” en distintas direcciones no predominan la una

sobre la otra y la geomorfología del flujo se mantiene aproximadamente en el tiempo. [1]

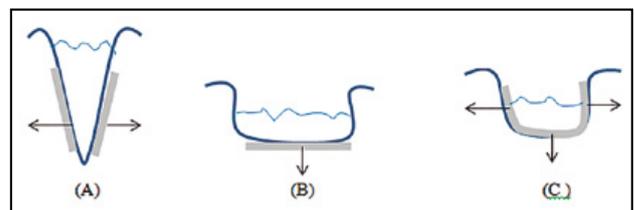


Figura 1. Procesos de “tallaje” en el lecho.

Este estado de “equilibrio dinámico” en el proceso de formación del cauce por el movimiento continuo del agua no solo se interpreta en términos de los cambios en las áreas efectivas de las paredes resistentes del lecho (efecto), sino también, e indisolublemente mediante la velocidad del flujo, la pendiente y la rugosidad superficial (causas). El efecto final de este proceso de estabilización en sentidos contrarios no solo afecta la dimensión transversal sino también la longitudinal. Así desde el punto de vista del perfil longitudinal del lecho, es que aquellos sitios donde haya una mayor pendiente la deposición de sedimento tratara

* Autor de contacto: alfredo.constain@gmail.com

¹ Hydrocloro Tech., Bogotá, Colombia

² Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

de suavizar el perfil, y que en aquellos sitios de pendiente “suave” la socavación tratara de “empinar” el perfil, siendo S_b la pendiente (figura 2).

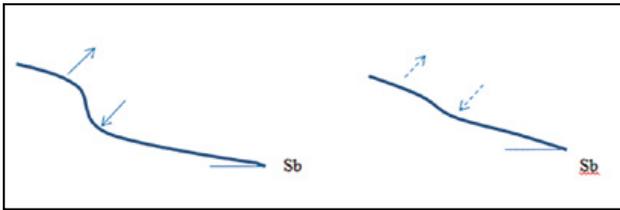


Figura 2. Proceso de igualación del perfil.

El “equilibrio dinámico” en la formación de los cauces puede entonces verse como una tendencia a la igualación de las tasas de “deposición” y “socavación” de sedimentos sobre el lecho, tanto en el perfil transversal como en el perfil longitudinal. Como quiera que el agente controlador directo de estos dos procesos opuestos es en realidad la velocidad media del fluido, este parámetro no tomara por supuesto valores arbitrarios sino aquellos compatibles con la tendencia explicita al mencionado “equilibrio dinámico”.

Ahora bien, para un grado dado de resistencia del lecho (dependiente de las características físicas de las partículas de ese lecho)- o sea lo que se denomina “rugosidad”, la pendiente como fuerza motriz del movimiento del fluido tomara un cierto valor que ajusta perfectamente la interacción VELOCIDAD-DEPOSICION-SOCAVACION. [2]

Por las anteriores razones las relaciones entre estos parámetros alométricos (de forma) de un cauce, o sea: ancho, profundidad, velocidad, pendiente, rugosidad y transporte de masa (sedimentos) son unas específicas: aquellas compatibles con la dinámica misma del cauce, o sea en el caso más simple (aproximado), con las definiciones de Chezy-Manning para flujo uniforme. [3]

Estas ecuaciones clásicas que normalmente se entienden como “puntuales” en general son mucho más que eso pues en el fondo atienden a cumplir con el principio de “equilibrio dinámico” del cauce. Quienes realizaron fundamentalmente el desarrollo de esta expresión del “equilibrio dinámico” en los cauces fueron L. Leopold y T. Maddock, mediante su modelo potencial aproximado, suponiendo una geometría simple para la sección transversal del flujo, con W como ancho medio, h como profundidad media, U como velocidad media, S_b como pendiente y n como Numero de Manning :

$$Q = W \times h \times U \quad [1]$$

$$W \approx a \sqrt[4]{Q} \quad [2]$$

$$h \approx c \sqrt[2]{Q} \quad [3]$$

$$U \approx k \sqrt[3]{Q} \quad [4]$$

$$S_b = p \frac{1}{\sqrt{Q}} \quad [5]$$

$$n \approx \frac{q}{\sqrt[4]{Q}} \quad [6]$$

En el grupo de ecuaciones anteriores, numeradas de [1] a [6], los parámetros a , c , k p y q son valores a hallar

mediante los datos experimentales. Normalmente se determinan a través de los datos Caudal-nivel de la oficina gubernamental de hidrología (en Colombia el IDEAM) y de los datos de trazador.

Por otro lado el mencionado “equilibrio dinámico” no solo se establece analíticamente mediante las anteriores relaciones alométricas, sino también y sobre todo mediante la condición que impone dicho equilibrio sobre el transporte de masa, en la medida en que la “deposición” y la “socavación” de sedimentos debe tender a ser equivalentes, o sea que en el volumen de control que es el tramo del cauce examinado la masa que ingresa es la masa que sale. Esta segunda condición se analiza detalladamente en seguida.

2. EXPRESIÓN APROXIMADA PARA LA CONDICIÓN DE “EQUILIBRIO DINÁMICO” EN LOS CAUCES NATURALES.

Es importante ahora ahondar en algunas de las consecuencias de la condición de “equilibrio dinámico” para un cauce natural, y poder luego establecer algunos criterios que permitan analizar la propia dinámica del cauce para propósitos de ingeniería.

Desde un punto de vista general, los sistemas hidrológicos se pueden considerar sistemas *cerrados* en estado *estable*, Ω , en los que se cumplen los principios básicos de la mecánica: El de “continuidad” o Principio de conservación de la masa, en el que la masa entrante, M_i , es igual a la masa saliente, M_o , con un diferencial neto nulo, $\Delta M=0$ (figura 3).

$$\Delta M = M_i - M_o = 0 \quad [7]$$

Y el Principio de conservación de la energía, en el que la energía mecánica entrante se convierte enteramente en energía térmica por degradación.

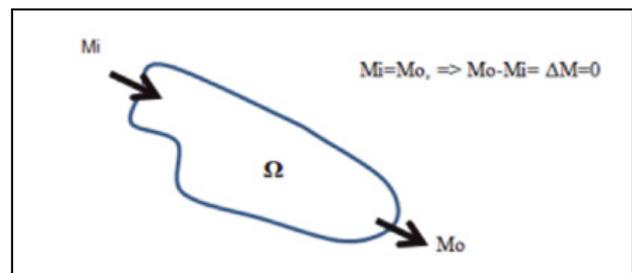


Figura 3. Conservación de la masa en un sistema cerrado.

$$\Delta U = \Delta Q \quad [8]$$

En este caso se puede ver que la pendiente, S_b aporta un componente inicial de energía potencial gravitatoria, ΔU el cual es transformado en energía cinética, ΔK (movimiento del agua) el cual finalmente es transformado enteramente en calor, ΔQ (totalmente irreversible) (figura 4).

También se ha demostrado que en los sistemas hidrológicos en los que se estudian los cambios de la geomorfología es importante aplicar además el segundo principio de la termodinámica, o principio de la entropía. En estas condiciones, para un sistema cerrado en el que toda la energía mecánica se transforma en calor (proceso totalmente irreversible) es necesario establecer además que sea isotérmico

(temperatura constante); se puede establecer entonces que la entropía es constante [4]. Esto implica que la producción interna de entropía, S_i , es igual a la entropía intercambiada en la frontera del sistema, S_e , y se tiene:

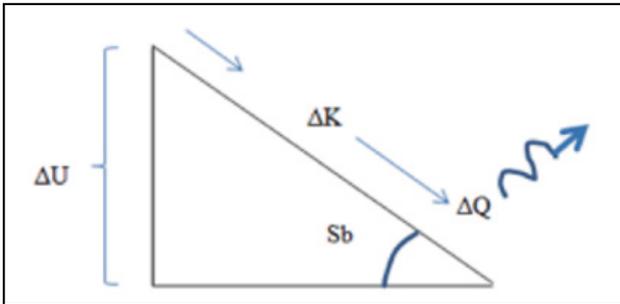


Figura 4. Transformaciones de energía en el flujo.

$$\Delta S = \Delta S_i - \Delta S_e = 0 \quad [9]$$

Ahora bien, si se cumple la igualdad [8] y con T como temperatura absoluta, se tiene que:

$$\Delta S_i = -\frac{\Delta Q}{T} = -\frac{\Delta U}{T} \quad [10]$$

Teniendo en cuenta la ecuación de los gases ideales, con n, número de moles y, R, la constante universal de los gases.

$$PV = nRT \quad [11]$$

Reemplazando esta ecuación en la anterior, se tiene:

$$\Delta S_i = -\frac{(nR) \Delta U}{PV} \quad [12]$$

Considerando ahora la presión $P=f/A$, f como fuerza, área como $A=\Delta Y \cdot \Delta X$, y un incremento de volumen, como $\Delta V=\Delta Y \cdot \Delta X \cdot \Delta Z$, con Y= ancho, X=largo y Z= profundidad del flujo, se tiene finalmente:

$$\left(\frac{\Delta S_i}{\Delta t}\right) = -\frac{(nR)}{q} \left(\frac{\Delta U}{\Delta V}\right) \quad [13]$$

Esto implica que el aumento de entropía interna por unidad de volumen lleva continuamente a la disminución de la energía disponible por unidad de volumen, así un máximo de entropía interna conlleva un mínimo de energía disponible. La entropía creciente dentro del sistema (que tiene que ser evacuada luego) genera una distribución cada vez más uniforme de energía dentro del volumen Ω . Mientras que el miembro izquierdo de la Ec. [13] indica la condición de generación de mínima entropía interna, el miembro derecho puede ser interpretada como la descripción de la más probable distribución de energía en el sistema. [5]

Esta es otra forma de establecer la convergencia muchas veces verificada entre el principio del mínimo trabajo y la más probable distribución de la energía en un sistema. Si esto es así entonces, de acuerdo con la fórmula estadística de Boltzmann, las probabilidades de los distintos eventos energéticos en el volumen de control Ω , deben iguales.

$$S_i = k \times \sum_{\Omega} p_i \times \ln(p_i) = \text{Maximo} \quad [14]$$

Implica que:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \dots = p_i \quad [15]$$

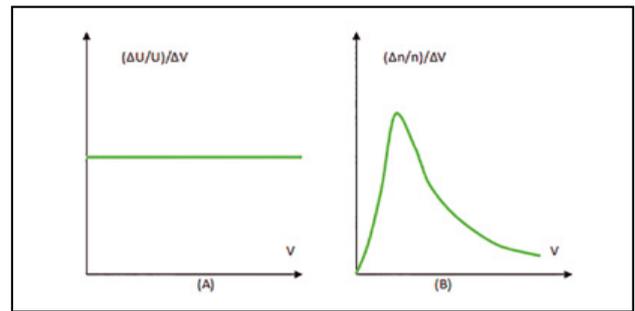


Figura 5. Distribución estadística constante y variable.

En concordancia con esta apreciación, se puede ver que en realidad el miembro derecho de la ecuación [13] Es la expresión de una “distribución estadística” en este caso constante o equiprobable (A), del mismo modo que se tiene en la distribución de Maxwell-Boltzmann variable (B) para el número de partículas gaseosas, “n” en función de la velocidad, “v”, teniendo la forma acampanada clásica (figura 5).

Lo anteriormente expuesto es significativo para este tipo de sistemas termodinámicos en los que los eventos individuales asociados a los intercambios de energía son equivalentes entre sí, o sea uniformes (indistinguibles) en todo el volumen (Sistema homogéneo (A)), correspondiente a la distribución estadística constante de la figura anterior. Diferente a un sistema en el que estas probabilidades son diferentes para cada punto (sistema heterogéneo (B)), correspondiente a la distribución estadística variable de la misma figura (figura 6).

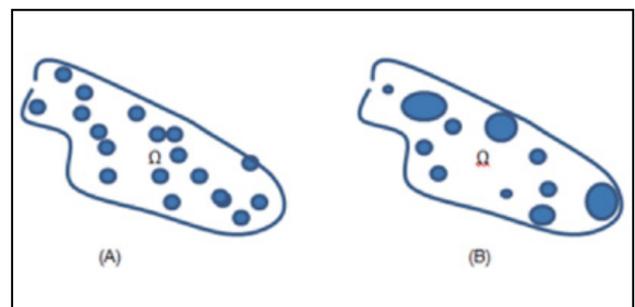


Figura 6. Sistemas homogéneos y heterogéneos

El “equilibrio dinámico” (estado estable) en los cauces naturales va a significar entonces no solo que el flujo neto de masa en las fronteras del sistema es aproximadamente nulo en virtud de la equivalencia entre socavación y deposición (conservación de la masa), sino también que los eventos individuales descritos mediante los intercambios de energía serán equivalentes, uniformes o indistinguibles en el volumen de control considerado (conservación de la energía y generación de entropía).

3. CALCULO DE LAS DIFERENTES TASAS DE TRANSPORTE DE MASA EN UN SISTEMA DE FLUJO EN “EQUILIBRIO DINAMICO”

Es interesante ahora estudiar las consecuencias concretas que pueden derivarse del “equilibrio dinámico” en los

cauces naturales, en especial la circunstancia de la “equiprobabilidad” para diversos sucesos de intercambio de energía dentro del sistema, en este caso la traslación de diferentes porciones de masa dentro del sistema, sea esta una masa disuelta o suspendida en un sistema hídrico.

Partamos del hecho de que en un flujo natural la energía potencial estará representada como se indica a continuación:

$$U = m \times g \times h \quad [16]$$

Supóngase que un cierto intercambio elemental de energía, dentro de un sistema que por motivos de su “localidad” está asociado más bien a un incremento de masa que a uno de distancia:

$$\Delta U = \Delta m \times g \times h \quad [17]$$

Si el sistema es *estacionario* (Equilibrio dinámico) entonces los diferentes intercambios de energía derivados de los intercambios de masa de partículas similares de soluto, tendrán igual probabilidad. Pensamos entonces en que los propios intercambios de masa, como distribución estadística en el tiempo estarán “igualados” también por este principio.

Corresponde por lo tanto a una distribución estadística *constante* similar a la de la figura 5 (A), solo que en lugar de la variable “energía potencial” U se tiene la variable masa M . Interesa además establecer la distribución repartida además en el tiempo.

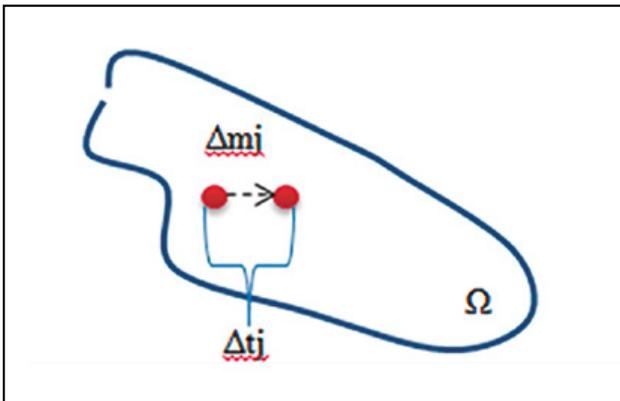


Figura 7. Movilización de un elemento de masa en Ω .

Matemáticamente esto se mide así:

$$Ttm_j = \frac{\Delta m_j}{\Delta t_j} \quad [18]$$

La tasa de transporte de masa “general” para el tramo considerado, definida por su valor representativo desde el punto de vista estadístico, es la *esperanza matemática* de los componentes individuales de transporte [6]. Por lo tanto su definición representativa en todo el dominio del volumen de control Ω será:

$$\langle Ttm \rangle = \frac{1}{j} \sum \frac{\Delta m_j}{\Delta t_j} \quad [19]$$

Pero como los elementos discretos de masa transportada son equivalentes (iguales por equiprobables), entonces queda:

$$\langle Ttm \rangle = \frac{1}{j} \times (j \times Ttm_j) \quad [20]$$

Finalmente.

$$\langle Ttm \rangle \approx Ttm_j \quad [21]$$

O sea, la tasa de transporte de masa “general” es convergente con las tasas de transporte de masa “locales” en “estado estable” del cauce, consideradas ellas como indistinguibles (iguales). En este caso lo *general* replica a lo *particular* (figura 8).

4. CÁLCULO DE LAS DIFERENTES TASAS DE TRANSPORTE DE MASA EN UN SISTEMA DE FLUJO EN “EQUILIBRIO DINÁMICO”: CASO DE LA MASA DISUELTA.

Aunque la masa transportada en el flujo puede ser *suspendida* o *disuelta*, es posible realizar un “balance detallado” [7] de ambos tipos de masas desde la óptica de la equivalencia entre “tasas de transporte locales” y “tasa de transporte general”. Esta es una consecuencia del equilibrio dinámico, en cuanto en esta condición cada transformación elemental es balanceada por su correspondiente específica, en el esquema concreto en el que hayan sido planteadas.

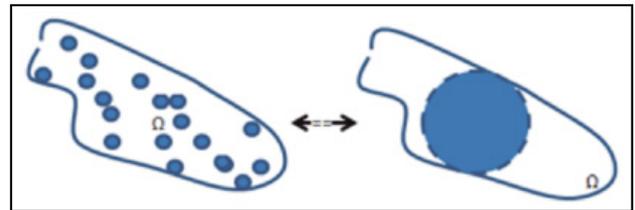


Figura 8. Sucesos locales reciprocamente equivalentes a un suceso general.

Entonces, si:

$$\langle Ttm \rangle_{(Disuelta + suspendida)} \approx Ttm_j_{(Disuelta + suspendida)} \quad [22]$$

Se sigue que:

$$\langle Ttm \rangle_{(Disuelta)} \approx Ttm_j_{(Disuelta)} \quad [23]$$

Y

$$\langle Ttm \rangle_{(Suspendida)} \approx Ttm_j_{(Suspendida)} \quad [24]$$

Por estas razones se aplicara el principio de equivalencia entre tasas de transporte “locales” y “generales” al componente disuelto, lo que facilita su análisis por medio de trazadores.

4.1. Calculo de la tasa de transporte de masa disuelta “General” el sistema.

En un flujo natural el aporte de solutos a la corriente es una característica propia de la cuenca y del caudal al cual se incorporan estas sustancias. Si se llama “ C_0 ” a la concentración base resultante de este aporte y “ Q ” al caudal correspondiente, la relación típica es una curva hiperbólica [8] (figura 9).

Esta relación tiene esta forma toda vez que entre mayor sea el caudal, para un aporte dado de solutos en el lecho, se tendrá un mayor volumen para disolver, o sea menor concentración.

$$Q \times C_o \approx k(Cte) \quad [25]$$

Atendiendo a la parte dimensional, la “constante” k es miligramos por segundo, o sea una tasa de transporte. Esta tasa es aproximadamente de carácter general pues corresponde a todo el aporte de solutos inyectado a todo el volumen de agua portado por el caudal. En este caso el evento considerado es correspondiente a masa disuelta.

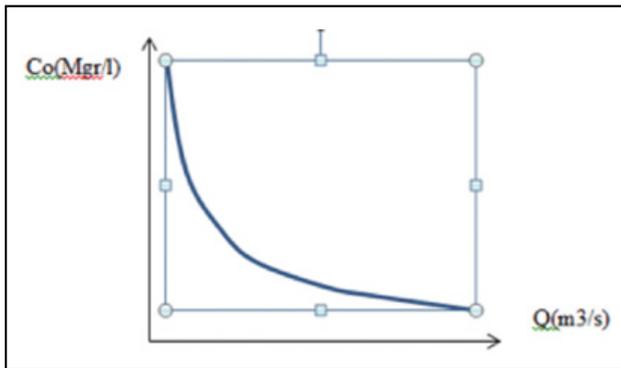


Figura 9. Relación entre concentración base y caudal.

4.2. Tasa de transporte de masa disuelta “local” medida por trazadores.

Una forma de medir las tasas “locales” de transporte de masa en los flujos naturales es por medio de trazadores, los cuales vertidos de forma súbita en un punto del tramo del cauce se pueden considerar como “testigos” locales del movimiento “individual” de la masa en el sistema Ω (figura 10).



Figura 10. El trazador como testigo “local” en el flujo.

Para entender apropiadamente como el trazador puede cumplir la misión de medir la tasa local de transporte de masa es necesario estudiar algunos puntos de la dinámica de los mismos.

4.3. Velocidad media del flujo en función de los datos del transporte dispersivo.

En anteriores artículos los autores han definido a esta función de la siguiente forma, relacionando dos velocidades, una la de dispersión del trazador, V_{disp} , de naturaleza

irreversible y medida por su desplazamiento *Random Walk* y la otra la de advección, U , como factor integrante. Aquí Δ y τ son parámetros característicos de desplazamiento y fase del movimiento Gaussiano mono-dimensional de la pluma de trazador. [9] [10]

$$\varphi = \frac{V_{disp}}{U} = \frac{\left(\frac{\Delta}{\tau}\right)}{\frac{\left(\frac{\sqrt{2E\tau}}{\tau}\right)}{U}} = \frac{\sqrt{2E}}{\tau} \quad [26]$$

Como quiera que V_{disp} mida la rapidez con que las partículas de trazador se alejan recíprocamente, es una función que representa la reacción del sistema a la ruptura súbita del equilibrio químico, y por lo tanto es un potencial termodinámico. La naturaleza especial de Φ se puede caracterizar diciendo que es una función de estado del sistema, definida mediante la siguiente ecuación:

$$\oint_C d\varphi = 0 \quad [27]$$

De la Ec. [26] se puede establecer una definición para la velocidad media advectiva:

$$U = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{2E}{\tau}} \quad [28]$$

Despejando a E :

$$E = \frac{\varphi^2 U^2 \tau}{2} \quad [29]$$

Debe notarse aquí que el tiempo característico Gaussiano τ es diferente a la variable independiente t , ya que la primera se refiere al tiempo en el cual la separación aleatoria de las partículas ocurre mientras esta distancia promedio es Δ , mientras que la escala temporal general se asocia más bien al efecto advectivo de U . La relación entre ambos tiempos se puede establecer mediante una dinámica del tipo Svedberg [11]

$$\beta = \frac{\tau}{t} = e^{-1.54} \approx 0.215 \quad [30]$$

4.4. La función de estado $\Phi(t)$

Debido a que $\phi(t)$ es un potencial termodinámico, y en consonancia con la ecuación [27] su valor inicial es el mismo que el final, es por lo tanto es una curva unimodal, con un pico en “ a ”, cuya parte utilizable siempre es después de $t=a$ (figura 11). El flanco ascendente corresponde a los fenómenos transitorios y muy rápidos que ocurren cuando el soluto conservativo se acopla en el líquido. Debido a que la velocidad V_{disp} va disminuyendo en la medida en que el sistema tiende irreversiblemente hacia el equilibrio después de $t=a$, entonces $\Phi(t)$ es decadente en su flanco más externo. Sabiendo que el parámetro inicial $\Phi(t \approx 0) \approx 2.16$ como un valor máximo, se puede demostrar que la forma de la función de estado es como sigue: [12]

$$\beta = \frac{\tau}{t} = e^{-1.54} \approx 0.215 \quad [31]$$

4.5. La descripción de la pluma de soluto vista por diferentes observadores

La transformación de Galileo para pasar de un sistema inercial a otro se incluye parcialmente en el argumento exponencial de la ecuación clásica de Fick, con M la masa de soluto y A la sección transversal del flujo:

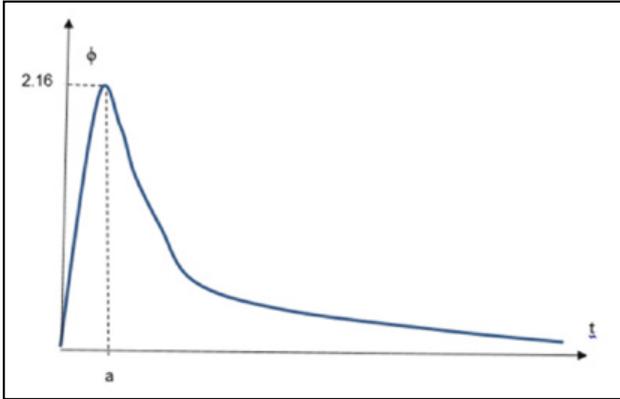


Figura 11. Φ como función de estado unimodal.

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi Et}} e^{-\frac{(x-ut)^2}{4Et}} \quad [32]$$

Sin embargo, dicha transformación es completa solo si el coeficiente E es una función del tiempo, tal como se describe en la ecuación [29]. Ahora reemplazando la Ec. [29] en la Ec. [33] se tiene con: $\sqrt{2\pi\beta} \approx 1.16$.

$$C(x,t) = \frac{M}{Q_l \varphi t 1.16} e^{-\frac{(x-ut)^2}{2\beta \varphi^2 u_x^2 t^2}} \quad [33]$$

La particularidad de esta ecuación (formula modificada de Fick) es que reproduce bastante bien las curvas experimentales de trazador como se mostrara más adelante. Supóngase que se realiza un vertimiento lateral de trazador desde la orilla de un flujo turbulento, tal como se muestra en la figura 10 con la pluma de trazador evolucionando en el tramo. Nótese que el caudal comprendido por el “tubo de corriente” que limita la pluma de trazador, Q_l , es un valor “local” toda vez que en principio, el trazador no ha cubierto todo el volumen del flujo real ni participa de la velocidad plena del flujo ($U_l < U$) ni su ancho efectivo es el de todo el flujo ($W_l < W$) ni tampoco que su profundidad (en la orilla) es la del cauce ($h_l < h$).

Debe recordarse además que en un cauce natural turbulento vale aproximadamente una distribución transversal de velocidades (línea punteada) tal como se muestra en la figura 11. Se muestra también en la gráfica la anchura “local” de la pluma de trazador (línea roja) mediante una pequeña flecha. Se asume que la profundidad es el valor medio de todo el cauce (para simplificar $h_l = h$).

$$Q_l \approx W_l \times h \times U_l \quad [34]$$

4.6. Medición de la tasa de transporte de masa local mediante la ecuación modificada de Fick

A partir de los conceptos desarrollados anteriormente se puede ahora definir la “tasa de transporte de masa

local” con base en experimentos de trazador. En el punto de medición para la ecuación [21] se tiene que la tasa local de transporte de masa es aproximadamente igual a la siguiente ecuación, con C_p como concentración pico para el trazador, considerado conservativo para que su disminución a lo largo del tramo sea debida únicamente al efecto dispersivo.

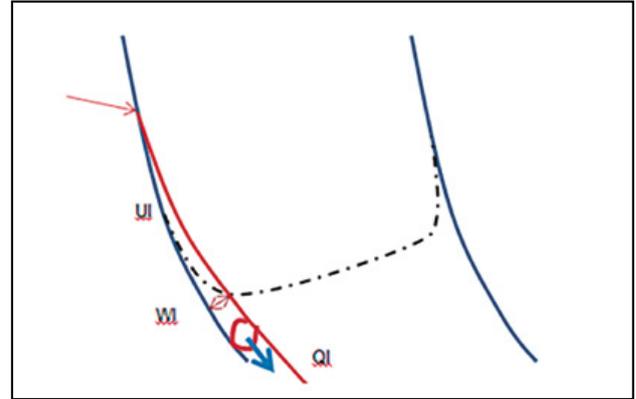


Figura 11. Velocidad y ancho locales para el trazador definiendo caudal local.

$$Ttm_j = \frac{\Delta M_j}{\Delta t_j} \approx \frac{M}{t} \approx C_p \times \varphi \times Q_l \times 1.16 \quad [35]$$

4.7. Igualación de la Tasa de transporte de masa “general” y “local” en un flujo en “equilibrio dinámico”

En correspondencia con lo establecido en el apartado 4, Ecuación [23] para la masa disuelta observada de forma “general” y “local” en un cauce natural, se tiene que para un flujo en equilibrio dinámico se cumple aproximadamente que:

$$Q \times C_o \approx C_p \times \varphi \times Q_l \times 1.16 \quad [36]$$

O sea:

$$\varphi \approx \frac{\left(\frac{Q}{Q_l}\right)}{\left(\frac{C_p}{C_o}\right)} \times 1.16 \quad [37]$$

Esta ecuación es bastante significativa, toda vez que Φ es una función de estado y tiene una significación termodinámica muy especial en tanto que refleja propiedades “generales” del sistema en el que evoluciona, aunque sea medida en zonas “locales”; así trae información del estado particular del proceso de avance de la mancha de trazador (Q_l y C_p), pero también de los procesos generales para el cauce en equilibrio dinámico (como Q y C_o).

Esta situación es lógica desde un punto de vista físico pues las probabilidades de los distintos eventos discretos son iguales en el sistema (tramo) y la función de estado debe reflejar esta particularidad, pero por otro lado distintos vertimientos tendrán distintas Concentraciones pico, dependiendo de la cantidad de masa vertida.

Esta circunstancia es muy importante para los procesos de análisis de los cauces naturales, pues una medición con trazador lleva información mucho más amplia que la circunscrita al ámbito espacial en la que se desarrolla. En

cierta forma la función de estado Φ describe el acople de lo “particular” o “local” a lo “general” y es muy útil sobretodo en cauces muy anchos en los que el trazador no ocupa todo el ámbito del flujo (figura 12).

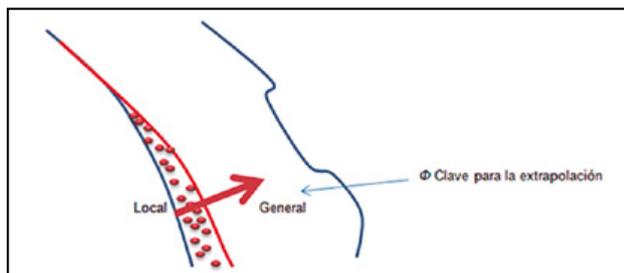


Figura 12. “Acople” del trazador en ríos anchos.

En razón de que la función de estado, Φ norma el acople de lo *local* a lo *general*, es factible en cauces muy anchos determinar aproximadamente las características “generales” a partir de mediciones “locales” en las que no es necesario utilizar grandes cantidades de trazador, solamente aquellas dosificaciones que permitan determinar cómodamente los parámetros que se usaran para la extrapolación exitosa. El cálculo teórico de la función Φ , como ya se ha explicado en otros artículos, se hace a partir del tiempo medido entre los dos puntos de inflexión de la curva Gaussiana experimental dividida por el tiempo de transporte y multiplicada por una constante.

En virtud de lo explicado en los párrafos anteriores, la Ec. [37] y el principio en el cual está basada es de importancia para desentrañar los mecanismos de formación de las plumas de trazador una vez que el soluto conservativo penetra en el agua. De esta forma, la concentración pico inicial del soluto *no* es independiente de la concentración base en su entorno físico y tampoco es independiente del valor del caudal general. Es como si en el tiempo de formación de la pluma, su evolución estuviese predeterminada por los parámetros generales del flujo, cuya información de alguna forma se transfiere a ese elemento de flujo; muy probablemente la naturaleza de esa información clave es electroquímica. La concentración de base C_0 es en principio “constante”, por lo tanto el ajuste requerido para obtener la concentración pico apropiada es función del tiempo; esto implica que su valor de ajuste debe ser calculado en un tiempo especial, como se analiza en seguida.

5. ¿DÓNDE APLICAR LA CONDICIÓN DE EQUIVALENCIA PARA LAS TASAS DE TRANSPORTE LOCALES Y GENERALES EN UN CAUCE EN “EQUILIBRIO DINÁMICO”?

5.1. La pendiente como dato clave de la condición de “equilibrio dinámico”

Una observación cuidadosa de lo expresado en la introducción con respecto al papel preponderante de la *pendiente* del flujo como agente básico de las transformaciones energéticas en los cauces y por lo tanto en las condiciones de establecimiento del “equilibrio dinámico” que lleva al balance de masa de socavación y de deposición en el tramo, nos indica que la función de estado Φ no es independiente

del mecanismo por el cual el flujo establece el valor preciso y específico de la *pendiente*, S_b , en el proceso de formación del cauce.

Aquí hay que decir que este *proceso físico* de fijación de la *pendiente* que actúa específicamente para las condiciones de velocidad media, caudal y rugosidad, tiene su símil en el *proceso analítico* para establecer cuál es el Coeficiente Longitudinal de dispersión del trazador (función de la pendiente) que vale realmente para el tramo en su conjunto. En virtud de este símil se podría decir que la función de estado que vale para la aplicación del principio de la equivalencia de las tasas de transporte es la misma que también vale para la determinación de la pendiente.

Para evidenciar esto tenemos necesariamente que referirnos a la ecuación de J.W. Elder y a su interpretación más reciente desde la teoría de los trazadores.

5.2. Calculo de la pendiente de un flujo en equilibrio dinámico según J.W.Elder

En 1959 J. W. Elder propuso su ya célebre definición para el mismo parámetro, E . [13]. Aquí h es la profundidad media del flujo, S_b es la pendiente como fuerza generatriz gravitacional del movimiento del flujo y g es la aceleración de la gravedad.

$$E \approx 5.93 \times h \times \sqrt{h \times g \times S_b} \quad [38]$$

Por supuesto si la Ec. [29] se equipara con la Ec. [38] se debe aceptar que la definición de Elder de E , debe ser también una función del tiempo. Es decir, puede moverse a través de la curva misma (figura 13).

5.3. Ubicación específica del Coeficiente Longitudinal de dispersión en la curva función del tiempo

En realidad no basta afirmar que la definición de Pendiente de Elder es una función del tiempo, sino que también hay que determinar en qué punto concreto de la curva estará situado el valor correspondiente (punto negro en la curva de la figura 13). Para realizar esta tarea es necesario primero estimar el rango aproximado del tiempo a trabajar.

5.3.1. Estimación del rango apropiado de tiempo

Se parte inicialmente de la Ec. [37] que da una pintura muy directa de las diferentes relaciones entre los parámetros de interés. Así por ejemplo, si se tiene en cuenta que ϕ máximo puede valer 2.16, entonces la razón del numerador y del denominador tienen que ser del mismo orden. Además de esto, para ríos grandes en el trayecto inicial del trazador $Q \gg Q_l$ lo que implica que $C_p \gg C_0$. Un dato importante de entrada es C_0 y C_p , necesarios para realizar este ejercicio.

5.3.2. Cálculos de la pendiente, Coeficiente de Chezy y función de estimación

Una vez estimado el valor probable del tiempo que vale para aplicar tanto la relación entre tasas de transporte, se procede a despejar la Pendiente de la ecuación de Elder. [14]

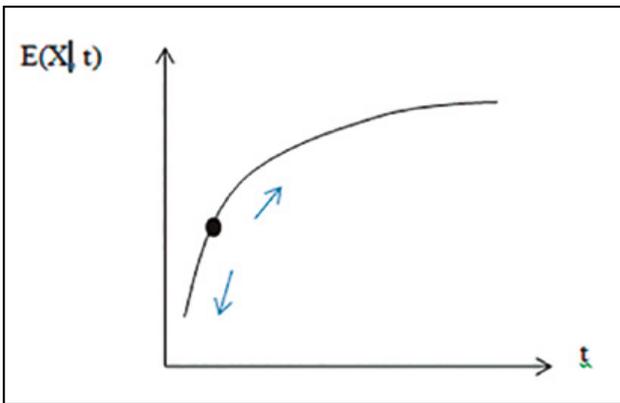


Figura 13. E como función del tiempo.

Este procedimiento hay que hacerlo mediante “prueba y error”, para ir determinando para varios valores de E cual es la que más se ajusta. El ajuste se hace mediante una función de estimación que se desarrolla en seguida. Es prudente comenzar por aplicar el valor inicial hallado mediante trazadores, según la Ec. [29]. Si este primer intento no se ajusta se usaran valores diferentes hasta lograr un ajuste apropiado, según se verá en la aplicación experimental posteriormente.

$$S_b \approx \frac{E^2}{35.2 \times h^3 \times g} \quad [39]$$

La función de estimación se define igualando las dos definiciones de velocidad media del flujo, la nueva representada en la ecuación [28] y la clásica para flujo uniforme de Chezy, con R como Radio hidráulico y C como el Coeficiente de Chezy (este literal, por el contexto, no debe confundirse con “concentración” que se define de la misma manera).

$$\frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{2E}{\tau}} \approx C \sqrt{RS_b} \quad [40]$$

A partir de allí se establece la función de estimación, F, que medirá la bondad de la aproximación que se haga para la pendiente mediante valores diversos de E. El ajuste es “ideal” cuando la función F es igual al coeficiente numérico de la ecuación de Elder:

$$F \approx \phi^2 \times 0.215 \times t_o \times \left(\frac{C^2}{2}\right) \times \left(\frac{R}{h}\right) \times \sqrt{\frac{S}{h \times g}} \rightarrow 5.93 \quad [41]$$

Entonces, la función de estado $\Phi(t)$ que aparece en las ecuaciones [37] y [41] es el mismo valor que garantiza la validez del concepto de “equilibrio dinámico” en el tramo estudiado del cauce natural, ajustado apropiadamente por la pendiente. La pendiente ajusta simultáneamente la dispersión y la equivalencia de tasas de transporte.

Cuando hay que realizar varias tentativas de “prueba y error” se debe recurrir de nuevo a la Ec. [29] y luego a la Ec. [39] para disponer de otros valores de E para determinar la pendiente con la debida aproximación.

6. PROCESO DE ACOPLAMIENTO DE LOS DATOS “LOCALES” A LOS DATOS “GENERALES”

Es necesario ahora detallar lo explicado someramente en el Apartado 4.6 y en la figura 11 con respecto al

“acoplamiento” de lo “local” hacia lo “general”, es decir determinar con precisión como se hace esta extrapolación en un cauce de grandes dimensiones. El primer punto a tocar es el relativo a la definición de “tubo de corriente” de trazador.

6.1. Definición del “tubo de corriente” para la evolución del trazador

Se define de manera elemental como el cilindro ideal dentro del fluido que contiene las partículas de trazador a partir del punto de inyección hasta el punto en donde se mide su evolución. Aunque es una definición vaga si transmite el concepto que quiere mostrarse.

El trazador paulatinamente se va extendiendo longitudinalmente y se va ampliando a lo ancho. En la fotografía superior de la figura 14 se muestra el aspecto real de dicho “tubo ideal” mientras que en el diagrama inferior se esquematiza de forma ideal como se “modeliza” su estructura. Como se puede ver en la figura inferior las partículas más exteriores de la pluma de trazador están en la frontera del tubo, aunque la mancha no es uniforme y no cubre algunas partes del soluto. Es una idealización útil para poner fronteras identificables a la propagación del soluto en el flujo.

A medida que las partículas van avanzando la parte central donde está la circunferencia azul punteada (sección transversal del tubo) pasa de tener muchas partículas muy concentradas en la parte del eje central (flecha azul) a tener muchas partículas distribuidas casi uniformemente en esa sección transversal. Se dice que en ese momento el trazador llena uniformemente esa área y se dice que el trazador cumple con “Mezcla completa” en dicho tubo. Naturalmente eso no ocurre de manera instantánea desde la inyección, de tal manera que se permita esa dispersión transversal significativa.

La distancia correspondiente se denomina “Longitud de mezcla” para el tubo considerado y se puede demostrar que ocurre a $\Phi \approx 0.38$ para el desarrollo de la pluma. [15]

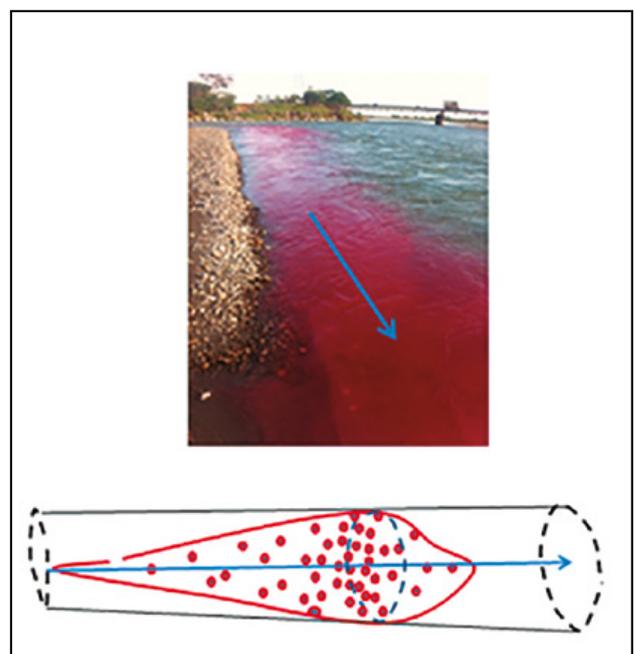


Figura 14. Tubo de corriente para la pluma de trazador y “mezcla completa” en la sección transversal.

6.2. Cálculo del ancho de la pluma y extrapolación a la "longitud de mezcla" de todo el cauce

Por definición el "ancho" de la pluma de trazador, W_l , es un parámetro "local" en cuanto corresponde a la coordenada transversal que es el "diámetro" del tubo de corriente de trazador, o sea el lugar geométrico que contiene las partículas de trazador, aproximadamente (figura 15).

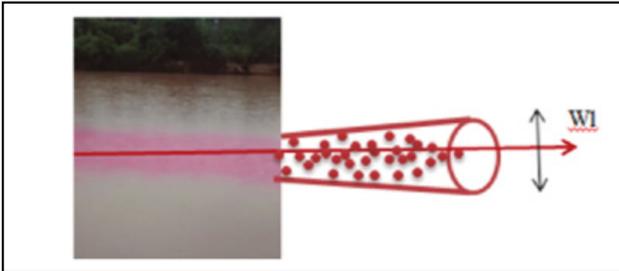


Figura 15. Estimación del ancho de la pluma por su "tubo de corriente".

En cauces pequeños ($W_l \rightarrow W$) el tubo de corriente de trazador ocupará todo el flujo de manera muy rápida, mientras que en ríos anchos ($W_l \ll W$) dicho tubo seguirá por un volumen propio mucho menor. En el primer caso se define como un caso "suficiente" y en el segundo como "insuficiente" (figura 16).

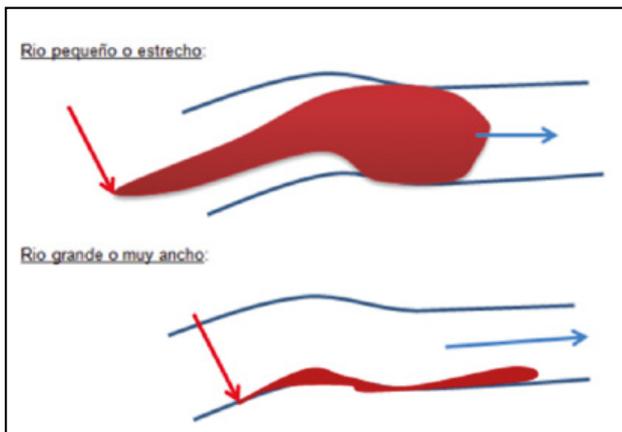


Figura 16. Tubo de corriente de trazador suficiente e insuficiente.

6.2.1. Medida de "Longitud de mezcla" para cauces estrechos, caso "suficiente"

Para cauces estrechos en los que el "tubo de corriente" es suficiente con respecto al flujo mismo, la "Longitud de mezcla" puede medirse por el criterio simple de $\Phi \approx 0.38$. Para cauces anchos esta situación no se da ya que $\Phi(X)$ puede alcanzar valores muy pequeños ($\Phi \ll 0.38$) para cuando el trazador alcance a llenar uniformemente la sección transversal de *todo* el flujo, o sea cuando $W_l \approx W$.

6.2.2. Medida de "Longitud de mezcla" para cauces anchos, caso "insuficiente".

Se puede establecer que en cauces de cierto tamaño, en los que el criterio simple de $\Phi \approx 0.38$ no se puede utilizar directamente, se prefiere aplicar la ecuación de Ruthven, Ec.

[42] Que es de naturaleza general, enfocada a establecer cuando el ancho local = " W_l " alcanza a ser igual al ancho general = " W ". Una versión aplicable a todo tipo de vertimientos de trazador (en la orilla o en el centro) es la siguiente aplicada al "tubo de corriente" de trazador [16]:

$$L_m \approx \frac{0.31 \times U \times W_l^2}{\varepsilon_y} \quad [42]$$

Por lo tanto el "ancho" del tubo de corriente de trazador, con t_0 igual al tiempo en el cual dicho tubo alcanza "mezcla completa" en $\Phi \approx 0.38$, se puede establecer como:

$$W_l \approx \sqrt{3.22 \times \varepsilon_y \times t_0} \quad [43]$$

Como el flujo mismo (no el tubo de corriente) tiene por sí mismo un ancho " W " (que en cauces anchos $W \gg W_l$) hay que calcular un nuevo tiempo " t_1 " en el cual el flujo general cumple con $W_l \rightarrow W$, o sea el tiempo para el cual el cauce como un todo alcanza su propia "longitud de mezcla".

$$t_1 \approx \frac{W^2}{3.22 \times \varepsilon_y} \quad [44]$$

La "longitud de mezcla" para *todo* el cauce se calcula aproximadamente conociendo el dato de velocidad media del flujo (estrictamente para todo el tramo desde la inyección hasta t_1):

$$L_m \approx U \times t_1 \quad [45]$$

En la figura 17 se esquematiza la evolución de la pluma de trazador hasta alcanzar la "longitud de mezcla" general del cauce.

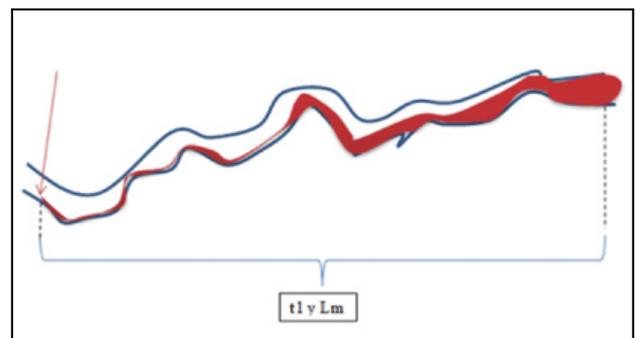


Figura 17. Tubo de corriente de trazador completa la "longitud de mezcla" general.

El Coeficiente transversal de difusión, ε_y , se calcula en principio por medio de una segunda ecuación de Elder, Ec. [46], una vez se haya obtenido el valor correspondiente de pendiente, S_b , mediante el procedimiento explicado en el Apartado 5.3.2

$$\varepsilon_y \approx 0.23 \times h \times \sqrt{h \times g \times S_b} \quad [46]$$

Este valor deberá ser verificado por la congruencia con los demás datos, una vez que se tenga el cuadro completo de valores del cauce.

6.3. Estimación de la distribución lateral de velocidades y cálculo de la velocidad media del cauce

6.3.1. Concepto básico

Esta distribución se asume válida mediante la curva normalizada para un flujo turbulento confinado en un tubo rugoso. Esta distribución se define desde la orilla hasta el centro del cauce ($W_{med}=W/2$) en donde se asume la velocidad máxima, U_{max} . La pluma de trazador se ubica adyacente en la orilla, ocupando un ancho Wl . Que se muestra aproximadamente en el esquema de la figura 18.

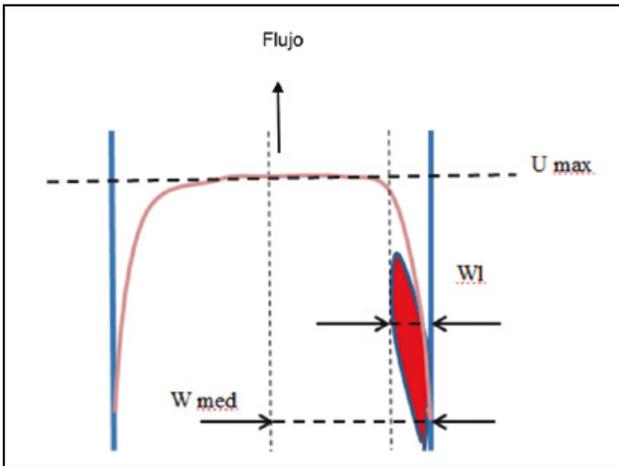


Figura 18. Distribuciones transversales de velocidades longitudinales y la pluma de trazador.

En seguida se presenta dicha distribución normalizada dibujada con precisión (figura 19). Se puede demostrar a partir de esta distribución que la velocidad media del flujo vale aproximadamente:

$$\bar{U} \approx 0.93 \times U_{max} \quad [47]$$

La aplicación práctica de esta ecuación se hace, o bien de manera experimental mediante una medición aproximada en el centro del cauce usando trazadores, o bien mediante una estimación aproximada del ancho de la pluma, “ Wl ” para aplicar la curva normalizada de la figura 19.

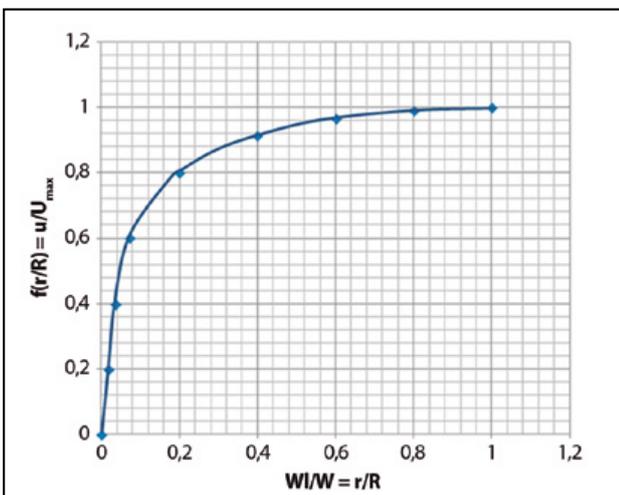


Figura 19. Distribución lateral de velocidades normalizadas en función de la razón Wl/W_{med} .

En cualquier caso estas dos aproximaciones deben ser cercanas. Las velocidades adyacentes a las orillas deben ser menores a la media y a la máxima, en tanto el ancho de la pluma sea mucho menor que el ancho general del cauce. Las velocidades “locales” (adyacentes a las orillas) se miden con experimentos de trazador.

6.3.2. Pertinencia del uso de la curva de distribución lateral de velocidades

Hay casos en los que el trazador ha evolucionado mucho y la anchura de la pluma es bastante significativa en comparación con la anchura general del cauce. En estos casos la velocidad medida con el trazador es prácticamente la velocidad media del flujo en el tramo. Cuando el cauce es muy ancho o el soluto no ha evolucionado lo suficiente para que el ancho de la pluma sea significativo, entonces es necesario hacer una medición de la velocidad máxima en el centro y derivar la velocidad “local” en función de la curva de la figura 19.

6.4. Cálculos de Caudal

6.4.1. Por el principio de conservación de la masa

Si el trazador utilizado se puede considerar conservativo, entonces el caudal puede calcularse con el área bajo la curva del trazador, adecuadamente limitada al principio y fin de la curva, así:

$$Q \approx \frac{M}{\int_{tb}^{tb} c(t) dt} \quad [48]$$

6.4.2. Por el dato del trazador

El dato de caudal usando los trazadores se hace despejando este parámetro de la Ec. [31], válido para el punto mismo de medición, donde el exponente neperiano es la unidad.

$$Q \approx \frac{M}{C_p \varphi t^{1.16}} \quad [49]$$

Esta ecuación es válida para el “tubo de corriente” de trazador que muestre una función de estado de evolución $\Phi(X)$, es decir es estrictamente para el caso “local”. Para calcular el caudal “general” correspondiente a todo el cauce hay que realizar extrapolación, tal como se indica a continuación.

6.4.3. Errores asociados al cálculo del caudal “local”

A. Error de caudal por defecto de masa

En tanto el trazador conservativo avanza en un tubo de corriente cualquiera (suficiente o insuficiente) y alcanza la llamada “Mezcla completa”, o sea la condición que cumplen las partículas del soluto cuando se distribuyen homogéneamente en toda la sección transversal a la “Longitud de mezcla”, L_m , entonces la función de estado detecta esta situación cuando toma el valor $\Phi \approx 0.38$.

Sin embargo para situaciones anteriores donde $\Phi > 0.38$, el trazador no cubre homogéneamente dicha sección transversal, siendo una situación deficitaria que se incrementa en tanto se esté cada vez más cerca del punto de inyección. Este efecto se puede entender como una falta de disponibilidad del trazador para difundirse a lo ancho (figura 20).

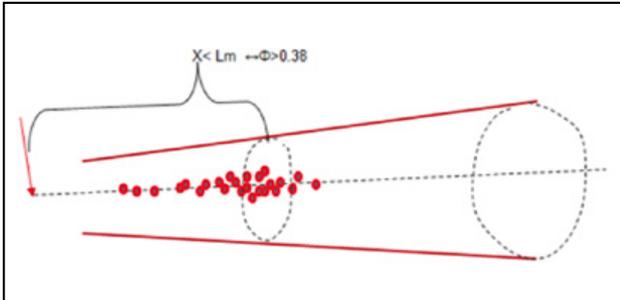


Figura 20. No disponibilidad de masa en la sección transversal del tubo para $\Phi > 0.38$.

Este “defecto” de masa para difusión se convierte en un error sistemático en el cálculo del caudal si se tiene en cuenta que en el numerador de la Ec. [49] se ingresa numéricamente el valor “pleno” de la masa (que no está disponible en esa proporción total).

El cálculo de este error sistemático por “defecto de masa” antes de “Mezcla completa” en el tubo de corriente de trazador se hace mediante la siguiente curva aproximada. [17] (figura 21). En esta grafica el parámetro “ r_q ” se define de la siguiente manera:

$$r_q \approx \frac{M_{nominal}}{M_{efectiva}} \approx \frac{Q_{nominal}}{Q_{efectivo}} \quad [50]$$

Se entiende que las razones de caudales es igual a las razones de las masas si se tiene en cuenta que el cálculo de caudal se hace mediante la Ec. [50] de trazadores. Por lo tanto, el caudal efectivo (sin error sistemático) será:

$$Q_{efectivo} \approx \frac{Q_{nominal}}{r_q} \quad [51]$$

En la aplicación experimental del método se explica en detalle el uso de la Ec. [51] para conocer el dato real de caudal.

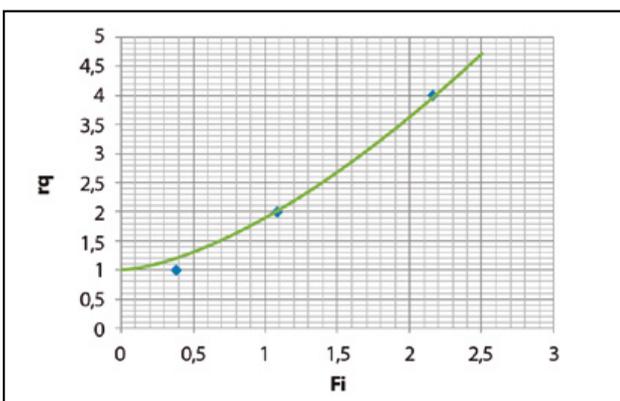


Figura 21. Curva para calcular el error sistemático de caudal por “defecto de masa”.

B. Error por “datos locales” usando trazadores

Este error se presenta cuando se aplican valores “locales” y no generales en una situación “insuficiente” (para un cauce en el que $W \gg Wl$), asumiendo como es usual en los modelos clásicos de cauce una geometría simple de sección transversal rectangular. Esta ecuación por otro lado debe ser convergente con la ecuación de caudal de trazadores.

$$Q_L \approx W_l \times h_l \times U_l \approx \frac{M}{C_p \times \varphi \times t \times 1.16} \quad [52]$$

Para cálculos prácticos es interesante ir chequeando la congruencia de los diferentes valores involucrados en las ecuaciones.

6.4.4. Extrapolación del valor del caudal a todo el cauce

El proceso de corrección de este error coincide en realidad con el de “extrapolación” para cauces muy grandes, es decir cuando el ancho de la pluma de trazador alcance a ser igual al ancho mismo del cauce ($W = Wl$) y se aplicara en el caso experimental considerado en este artículo. El valor correcto de U será el del valor medio, lo mismo que para la profundidad h . Para cauces estrechos en condición “suficiente” normalmente este paso de extrapolación se obvia. El procedimiento de extrapolación se hará con base en los procedimientos de cálculo de la anchura “local” de la pluma de trazador, Ec. [43] y cálculo de la velocidad local con base en la curva de la figura 19.

En algún caso es interesante documentar los pasos sucesivos del caudal correspondientes a diferentes distancias, velocidades, anchos y profundidades. No se comete gran error si se usa de entrada para todos estos casos la profundidad media del cauce, eliminando un factor de incertidumbre (figura 22).

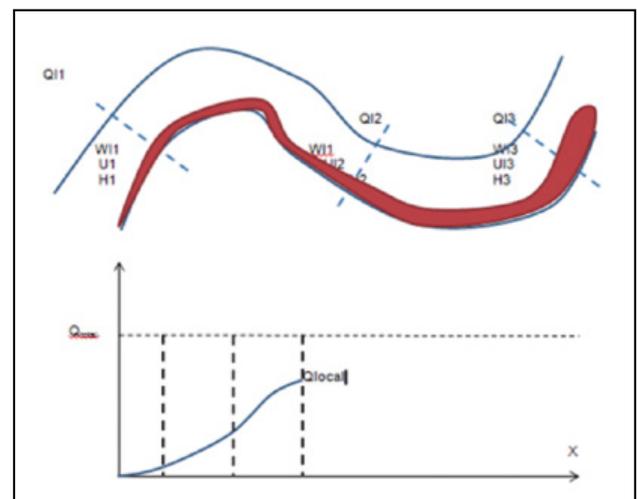


Figura 22. Extrapolación secuencial del caudal para un cauce grande (ancho).

6.4.5. Verificación del valor del caudal extrapolado

Cuando por extrapolación la condición de $Wl = W$ se produce, simultáneamente se tiene que el trazador alcanza la “longitud de mezcla” general, tal y como se ha explicado en el Numeral 6.2.2. (figura 23).

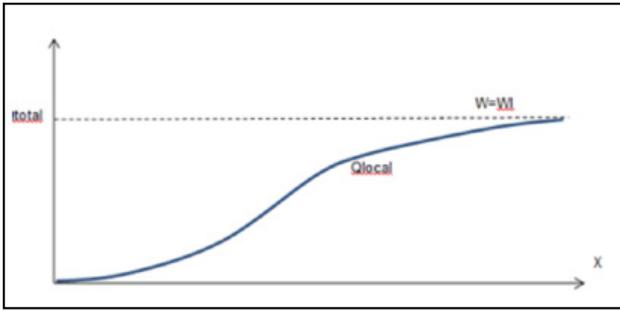


Figura 23. Extrapolación del caudal general cuando $W=WI$.

Para esta condición se puede demostrar que existe una situación aproximada al equilibrio termodinámico, teniendo en cuenta que el sistema se considera isobárico (equilibrio mecánico), isotérmico (equilibrio térmico) y como la difusión transversal prácticamente ha cesado (equilibrio químico).

Se puede entonces aplicar un principio de la Mecánica Estadística denominado “Ergodicidad”. Este principio tiene múltiples variantes pero al caso de la pluma de trazador se puede aplicar en el sentido de igualar la distribución de la concentración transversal (rojo) y la concentración asociada a todo el volumen del flujo en el tramo considerado (rosado). Los subíndices “o” significan que se miden en “longitud de mezcla” de todo el cauce (figura 24) [18]

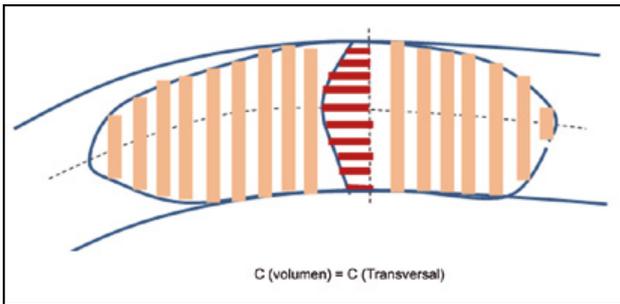


Figura 24. Igualación de dos concentraciones notables.

$$C(\text{volumen}) \approx C(\text{transversal}) \quad [53]$$

Correspondientemente:

$$\frac{M}{Q_o \times t_o} \approx 0.441 \times Cp_o \quad [54]$$

De aquí se despeja el caudal

$$Q_o \approx \frac{M}{t_o \times Cp_o \times 0.441} \quad [55]$$

Este valor debe ser coincidente con el caudal extrapolado según el procedimiento indicado anteriormente.

6.5. Acoplamiento de los datos de transporte dispersivo al cauce completo

6.5.1. El Coeficiente longitudinal de dispersión

Normalmente el dato de Coeficiente Longitudinal de dispersión ajustado mediante las Ec. [29] y Ec.[38] corresponden a *todo* el flujo, en tanto permitan calcular el valor

de la pendiente, S_b , que es por definición de naturaleza general. Por tal razón este primer parámetro de transporte dispersivo no se extrapola como en los casos anteriores de la hidráulica.

6.5.2. El Coeficiente transversal de difusión

En tanto este coeficiente sea calculado a partir del dato de la pendiente mediante la Ec. [34] su naturaleza es general y no requiere se extrapolada para el caso de cauces grandes o muy anchos.

6.5.3. Los valores de la Concentración Pico, C_p

Estos son datos muy importantes para los estudios de calidad del agua en tanto pueden ser aplicados al estudio de los impactos del recurso por inyección de contaminantes a los flujos naturales. Los valores locales tienen por lo tanto una importancia grande y su extrapolación no es un dato interesante en tanto los casos de interés transcurren en ámbitos puntuales, bien sea adyacente a las orillas o en puntos focalizados del interior del flujo en donde los tubos emisarios se colocan para descargar las aguas usadas.

Es de interés más bien establecer la curva de este parámetro en función de la distancia (tiempo) ya que es de interés de los especialistas estimar la “fuerza” relativa de un contaminante en función de la lejanía del punto de medición con respecto al punto de vertimiento. En este caso hay que tener por lo menos tres datos para aproximar la curva decadente, la cual teóricamente tiene la siguiente forma [19].

$$C_p \approx \alpha \times t^{-\frac{6}{3}} \quad [56]$$

Un dato corresponde a la medición directa de trazador en un punto dado del recorrido del soluto; otro dato (segundo) en caso en que no se tomen sino un solo dato experimental es el que puede estimarse al aplicar el procedimiento del Apartado 4.7, y despejando C_p de la Ec. (38).

$$C_p \approx \frac{Q \times C_o}{\varphi \times Q_i \times 1.16} \quad [57]$$

El tercer dato corresponde a la concentración pico en “longitud de mezcla” general despejada a partir de la ecuación del Principio “ergódico”, despejando C_{p_o} :

$$Cp_o \approx \frac{M}{t_o \times Q_o \times 0.441} \quad [58]$$

El siguiente paso es el cálculo del parámetro “ α ” para disponer de la curva requerida. Aunque en realidad este parámetro es función del tiempo (distancia), una primera aproximación válida es mediante un promedio de la siguiente estimación tomada para los dos puntos:

$$\alpha \approx \frac{C_p}{(t)^{-\frac{2}{3}}} \quad [59]$$

Esta primera estimación puede mejorarse mediante un modelo euleriano decadente, ajustando por prueba y error que la curva resultante recoja en su recorrido los

tres puntos considerados. Naturalmente si se tienen más puntos (tomados de más experimentos) se mejorara la estimación.

7. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO DE ACOPLAMIENTO PROPUESTO

Para este efecto se han escogido los datos de campo realizados sobre el Rio Pance, cercano a la ciudad de Cali en el suroccidente de Colombia. Este cauce a pesar de ser de montaña con una rugosidad y pendiente altas presenta un ancho y un caudal significativo. [20]

7.1. Aspectos del Cauce

Diversos aspectos del tramo medido se muestran en la figura 25.



Figura 25. Aspectos del cauce en el tramo medido.

7.2. Instrumentación utilizada y aspectos del vertimiento de trazador iónico

Para las mediciones con trazador iónico (sal común) se utilizó un avanzado dispositivo denominado IDF (Inírida Deep Flow) desarrollado en Colombia para operar en “tiempo real”, potente interfaz gráfica que permite un trabajo interactivo y guardar los aforos en memoria. En la figura 26 se muestran algunos aspectos de la instrumentación y de la inyección de trazador “aguas arriba”



Figura 26. Aspectos del instrumento IDF y de la inyección de trazador.

7.3. Pantallas de la medición desde el equipo IDF

Se muestran a continuación fotografías de las pantallas del instrumento con los datos respectivos de la medición (figura 27).

En la primera foto (izquierda superior) se muestra la curva experimental (trazo azul irregular) y sobre puesto el modelo teórico logrado con la aplicación de la Ec. [33] dando los datos de la tabla 1, La cercanía del modelo teórico y la curva experimental es una garantía de la certeza de los datos obtenidos por el instrumento. La foto superior derecha corresponde al cálculo del caudal mediante el principio de conservación de la masa (área bajo la curva de trazador). La foto inferior izquierda corresponde a la pantalla del instrumento en la que se muestra el cálculo de la función de estado, $\phi(t)$ para la medición a $X=400 m$. La foto inferior derecha muestra algunos datos calculados por el software del equipo.

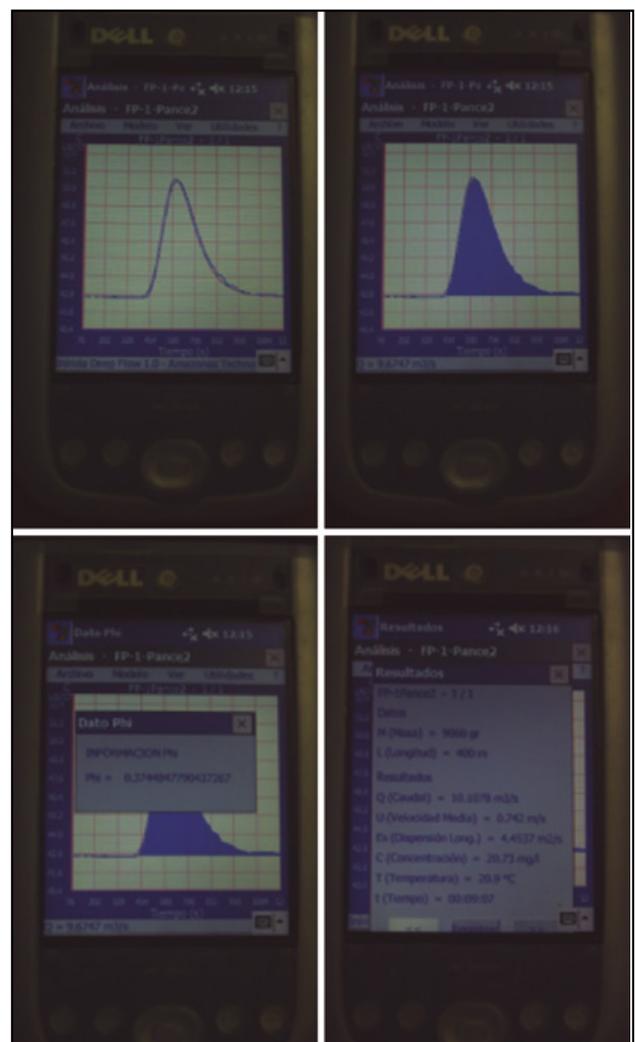


Figura 27. Aspectos de las pantallas de las mediciones desde el equipo IDF.

7.4. Cuadro de datos numéricos

El siguiente cuadro, tabla 1, condensa las informaciones recogidas por el IDF en la medición sobre el cauce:

Se parte del dato de distancia del vertimiento y la medición que fue de $X=400 m$ para un ancho estimado de $W=20 metros$.

Tabla 1. Resultados de trazador

Vertimiento	Concentración base, C_0 Mgr/l	Masa, M K	Velocidad Media, U_x M/s	Φ	Caudal, Q M ³ /s	Caudal, Q_a (área bajo la curva) M ³ /s	C_p , Concentración pico Mgr/l	T S	E, Coeficiente dispersión Longitudinal
X=400 m	29.4	9.060	0.742	0.37	10.1	9.7	3.9	539	5.39
Promedio					9.9				

8. DESARROLLO DEL ESTUDIO

8.1. Análisis local

Verificación y cálculo de la curva de tendencia para C_p y ϕ a partir de la información para $X=400m$ y $t=539s$

Se tiene un valor aproximado dado por el instrumento de medición IDF de $\phi \approx 0.37$. Se calcula aproximadamente con la Ec. (31) el parámetro “ α ”:

Calculo de “ α ”:

$$\alpha \approx \frac{M}{Q \times \phi \times 1.16} \times \frac{1}{\sqrt[3]{t}} \approx \frac{9060000 \text{ Mgr}}{10100 (l/s) \times 0.37 \times 1.16} \times \frac{1}{\sqrt[3]{539}} \approx 257 \quad [60]$$

Verificación de “ C_p ”:

Se verifica la fórmula para el valor experimental para $t=539s$.

$$C_p \approx 257 \times t^{-\frac{2}{3}} \approx 257 \times (539)^{-2/3} \approx 257 \times 0.015 \approx 3.9 \text{ Mgr/l} \quad [61]$$

Verificación para “ ϕ ”

Se verifica la fórmula para el valor experimental para $t=539s$:

$$\phi \approx \frac{M}{Q \times \alpha \times 1.16} \times \frac{1}{\sqrt[3]{t}} \approx \frac{9060000}{10100 \times 257 \times 1.16} \times \frac{1}{\sqrt[3]{t}} \approx 3.0 \times \frac{1}{\sqrt[3]{t}} \quad [62]$$

$$\phi \approx 3.0 \times \frac{1}{\sqrt[3]{539}} \approx 0.37 \quad [63]$$

8.2. Análisis de la transición: del vertimiento al punto de medición

Análisis del tiempo de cálculo para relación de tasas de transporte y ecuación de Elder.

Se tiene que para $t=539s$ la $C_p = 3.9 \text{ Mgr/l}$ y $C_0 = 29.4 \text{ Mgr/l}$, o sea $C_p \ll C_0$ lo que implicaría $Q \ll Q_l$, lo cual no tiene aceptación pues el caudal local siempre es menor (o igual) al caudal general. De aquí se deduce que el rango del tiempo tiene que ocurrir para tiempos muy pequeños, al principio del vertimiento para que $C_p \gg C_0$ y se tenga $Q \gg Q_l$ para que ajuste ϕ a valores altos pero compatibles con su máximo de 2.16.

Se procede a asumir un pequeño valor de $t=1s$ y se valida luego la decisión mediante el cálculo congruente de los parámetros involucrados.

Calculo de Elder para la pendiente:

Se inicia el proceso calculando el Coeficiente longitudinal de dispersión, suponiendo que para este tiempo tan inmediato al vertimiento la función de estado $\phi \approx 2.16$

$$E(t=1s) \approx \frac{\phi^2 \times U^2 \times 0.215 \times t}{2} \approx \quad [64]$$

$$\approx \frac{2.16^2 \times 0.74^2 \times 0.215 \times 1}{2} \approx 0.28$$

Se calcula luego la pendiente probable:

$$S \approx \frac{E^2}{35.2 \times h^3 \times 9.81} \approx \frac{0.28^2}{35.2 \times 0.57^3 \times 9.81} \approx 0.00123 \quad [65]$$

Se calcula luego el coeficiente aproximado de Chezy:

$$Ch \approx \frac{U}{\sqrt{RS}} \approx \frac{0.74}{\sqrt{0.57 \times 0.00123}} \approx 28.0 \text{ m}^{1/2} / s \quad [66]$$

Se calcula luego la función de estimación:

$$F \approx \phi^2 \times 0.215 \times t \times \frac{Ch^2}{2} \times \sqrt{\frac{S}{h \times 9.81}} \approx 5.83 \quad [67]$$

Este valor se considera satisfactorio en tanto es cercano al ideal de 5.93, y entonces se pueden tomar como correctos los valores aproximados calculados anteriormente.

Calculo de la razón de tasas de transporte:

Se empieza calculando aproximadamente el coeficiente transversal de difusión, el ancho local de la pluma para luego calcular el caudal local:

$$\varepsilon_y \approx 0.23 \times h \times \sqrt{h \times 9.81 \times S} \approx \quad [68]$$

$$\approx 0.23 \times 0.57 \times \sqrt{0.57 \times 9.81 \times 0.00123} \approx 0.011 \text{ m}^2 / s$$

$$W_l \approx \sqrt{3.22 \times \varepsilon_y \times t} \approx \sqrt{3.22 \times 0.011 \times 1} \approx 0.06 \text{ m} \quad [69]$$

$$Q_l \approx W_l \times U \times h \approx 0.06 \times 0.74 \times 0.57 \approx 0.025 \text{ m}^3 / s \approx 25 l / s \quad [70]$$

La razón de caudales es entonces:

$$\frac{Q}{Q_l} \approx \frac{10100}{25} \approx 404 \quad [71]$$

Por lo tanto la razón de concentraciones en estado estable y el C_p para $t=1s$ son:

$$\frac{C_p}{C_0} \approx \frac{\left(\frac{Q}{Q_l}\right)}{2.16 \times 1.16} \approx \frac{404}{2.51} \approx 161.6 \quad [72]$$

La concentración pico del trazador a $t=1s$ después del vertimiento es:

$$C_p \approx 161.6 \times 29.4 \approx 4751 \text{ Mgr/l} \quad [73]$$

Calculo del parámetro α (t):

A partir de esta concentración pico inicial y la que se tiene se puede establecer una función de decaimiento para " α (t)" que vale para el tramo estudiado. Esta función neperiana se establece de la siguiente forma, tratando de que contenga apropiadamente los dos datos experimentales de referencia (figura 28).

$$\alpha(t) \approx 4751 \times e^{-0.0054 \times t} \quad [74]$$

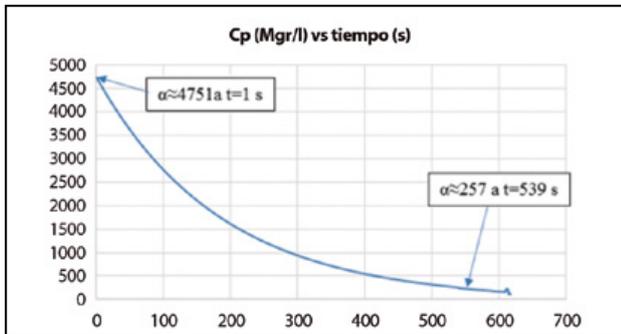


Figura 28. Curva de α (t) cubriendo los dos puntos específicos.

Curva para Cp:

A partir de la Ec. [74] se establece la curva aproximada para la concentración pico del trazador en el cauce estudiado (figura 29).

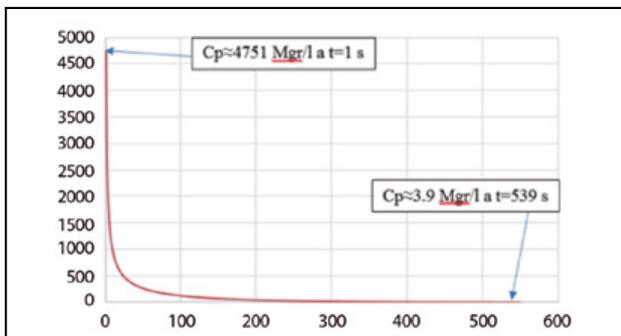


Figura 29. Curva de tendencia de Cp (t) cubriendo los dos puntos específicos.

Curva para ϕ (t):

A partir de las informaciones anteriores se puede ya tener aproximadamente la curva para ϕ (t) en todo el dominio de interés (figura 30).

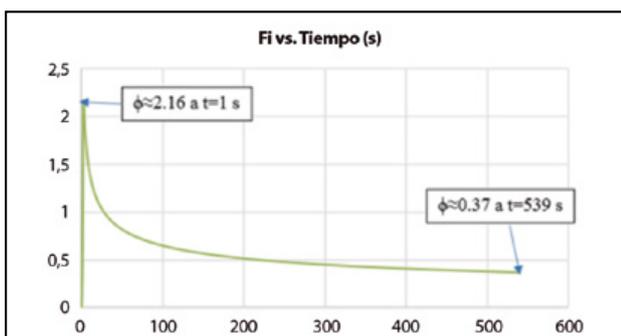


Figura 30. Curva de tendencia de Φ (t) en el rango de interés.

8.3. Análisis general

8.3.1. Calculo del ancho de la pluma en el punto de medición a $X=400$ m: ¿Está el trazador a "Longitud de mezcla" general?

Este cálculo se hace a partir del coeficiente transversal de difusión (ya hallado).

$$Wl \approx \sqrt{3.22 \times \varepsilon_y \times t} \approx \sqrt{3.22 \times 0.011 \times 539} \approx 19.1 \text{ m} \quad [75]$$

Este resultado significa que para un ancho estimado promedio del tramo de $W=20.0$ metros, el trazador a $X=400$ m del punto de inyección está prácticamente a "Longitud de mezcla" ya que $Wl \approx W$, y en este caso, el tubo de corriente de trazador se confunde con el flujo general del cauce. Corresponde a la situación definida como "suficiente". En este caso la condición de $\phi < 0.38$ para "Mezcla completa" usando el valor especial de la función de estado, es entonces válida no solo para el propio "tubo de corriente de trazador" sino para todo el cauce.

8.3.2. Verificación del caudal general

En primer lugar se debe verificar si existe o no "error sistemático" de caudal por defecto de masa. Como quiera que el tubo de corriente de trazador se confunde con el flujo mismo y en el punto de medición del instrumento la función de estado $\phi \approx 0.38$, entonces el error por difusión insuficiente es mínimo. De hecho se puede calcular con la curva de la figura 21, con $rq \approx 1.1$. De allí se sigue que el caudal real puede valer:

$$Q_{\text{efectivo}} \approx \frac{Q_{\text{nominal}}}{rq} \approx \frac{10100 \text{ l/s}}{1.1} \approx 9200 \text{ l/s} \quad [76]$$

Sabiendo que el cauce como un todo (en el tramo de interés) está en condiciones de "mezcla completa" para el trazador vertido desde una distancia de $X=400$ m, se puede verificar el valor del caudal efectivo por dos métodos:

A. Principio ergódico:

Se utiliza la Ec. (54):

$$Q_o \approx \frac{M}{t_n \times Cp_n \times 0.441} \approx \frac{9060000}{539 \times 3.9 \times 0.441} \approx 9773 \text{ l/s} \quad [77]$$

Este valor tiene un error porcentual del 3%, aceptable, por lo que este valor queda verificado por este principio físico.

B. Conservación de la masa:

Usando la formulación clásica de conservación de la masa, o sea integrando la curva de trazador entre los límites apropiados, t_a y t_b , el equipo IDF hace este cálculo cuyo resultado se consigna en la tabla 1 como " Q_a ", se tiene:

$$Q_a \approx \frac{M}{\int_{t_a}^{t_b} c(t) dt} \approx 9700 \text{ l/s} \quad [78]$$

En estas condiciones tomando un promedio de las diferentes expresiones, el valor real del caudal del tramo medido del Río Pance es de 9600 litros/s.

8.4. Aspectos del acoplamiento “local-general” para el tramo estudiado del Río Pance en el Valle del Cauca, Colombia.

De lo analizado en este artículo se pueden identificar los siguientes aspectos sobre el experimento de trazadores iónicos en el tramo del Río Pance:

- a) Dado que en este caso el trazador avanzó un trecho significativo y que cubrió casi el ancho del cauce en el tramo ($W=20\text{ m}$) no fue necesario utilizar ninguna interpolación usando la curva aproximada de distribución lateral de velocidades en el flujo. Se puede considerar que la velocidad que mide el equipo de trazador es la velocidad media correspondiente.
- b) Tanto la aplicación del principio de equivalencia de tasas de transporte de masa como la definición de pendiente en este cauce se requieren calcular al principio mismo de la inyección de trazador, toda vez que la definición de Concentración pico del trazador debe corresponder a condiciones locales y generales. Por otro lado como se ha explicado ambos criterios son coincidentes en el tiempo ya que la información global de “caudal” debe ser muy unida a la información de “pendiente”.
- c) Como solo se hizo un vertimiento no es posible realizar una gráfica sucesiva de acople del caudal “local” al “general”, solo se tiene un caudal local muy incipiente y uno general en longitud de mezcla. Los datos sin embargo son congruentes.

9. CONCLUSIONES

1. Las aplicaciones experimentales de los lineamientos teóricos presentados aquí fueron exitosas en la medida en que los diferentes datos son altamente congruentes entre sí, aceptándose que representan una descripción fiable de la evolución del trazador y su relación con los parámetros geomorfológicos e hidráulicos.
2. El concepto básico aquí discutido es el de “equivalencia de tasas de transporte” en los cauces naturales en la parte local y en la general; esta es una consecuencia de las propiedades estadísticas del flujo en condiciones estacionarias que aproximan el “equilibrio dinámico” analizado detalladamente por varios autores del siglo pasado, en especial Luna B. Leopold.
3. Esta equivalencia permite definir con precisión los mecanismos de formación de las plumas de trazador en los cauces naturales, y por lo tanto de interés para los especialistas que estudian los procesos de contaminación en los estudios de calidad de aguas.

10. REFERENCIAS

- Christofoletti, A. (1981). La noción de equilibrio en geomorfología fluvial. *Revista de Geografía Norte Grande*, 8, 69-86.
- Constain, A. J. (2012a). Aplicaciones prácticas al principio ergódico a la condición de “longitud de mezcla” usando trazador: análisis de dos cauces naturales en Colombia (río Pance y río Cali). *Revista Aqua-Lac*, 4 (1), 30 - 40.
- Constain, A. J. (2012b). Definición y análisis de una función de evolución de solutos en flujos naturales. *Revista Dyna*, 79 (175), 173-181.
- Constain, A. J. (2013a). Avances en los estudios de Calidad de aguas: parámetros de la metodología ADZ en función de parámetros IDF. *Revista Acodal*, 232, 29-44.
- Constain, A. J. (2013b). Aplicación de una ecuación de velocidad media en régimen no uniforme: Análisis detallado del transporte en el canal Caltech. *Revista Ingeniería Civil*, 170, CEDEX, 103-122.
- Constain, A. J. (2013c). A thermodynamic view of tracer plume evolution: Complete mixing condition evaluation. *European Physical Journal*, 50 (1), 2-7.
- Constain, A. J. (2014). Revalidación de la ecuación de Elder para la medición precisa de los coeficientes de dispersión en flujos naturales. *Revista Dyna*, 81 (186), 19-27.
- Constain, A. J., y Lemos R.A. (2011). Una ecuación de velocidad media del flujo en régimen no uniforme, su relación con el fenómeno de dispersión como función del tiempo y su aplicación a los estudios de calidad de agua. *Revista Ingeniería Civil*, 164, CEDEX, 114-135.
- Constain, A. J., y Corredor J. (2013). Evolution of conservative tracer plumes in turbulent flows: A thermodynamic description. *IJESIT Journal*, 2 (5), 185-197.
- Constain, A. J., Mesa, D., y Peña-Guzmán C. (2014). Procesos de transporte de masa en cauces naturales en equilibrio dinámico: Mecanismo de acople por estudio de trazador. Enviado a *Revista Dyna*, Medellín. Noviembre 2014.
- Constain, A. J., Peña, C., Mesa, D., y Acevedo, P. (2014). Svedberg's number in diffusion processes. *2014 International Conference in Hydraulic Resources*, Santorini (Grecia), 18-20 julio.
- Elder, W. J. (1959). The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 5 (4), 544- 560.
- Fischer, H. B. (1967). The mechanics of dispersion in natural streams. *Journal of the Hydraulics Division*, 93 (6), 187-216.
- Hack, J. T. (1957). *Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland*. USGS Paper 294-B, 45-97.
- Hem, J. (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. USGS, Water Supply Paper 2254.
- Leopold, L. B., y Langbein, W. B. (1962). *The Concept of Entropy in Landscape Evolution*. USGS Paper 500-A.
- Leopold, L. B., y Maddock T. (1953). *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. USGS Paper 252.
- Prigogine, I., y Kondepudi, D. (1998). *Modern Thermodynamics: from Heat Engines to Dissipative Structures*, Wiley, Chichester (Reino Unido).
- Spiridonov, V. P., y Lopatkin, A. A. (1973). *Tratamiento Matemático de datos fisicoquímicos*. Editorial Mir, Moscú.

Lucio del Valle: el sentido práctico al servicio de la sociedad

Su tiempo, vida y obra (1815-1874)

José-Carlos Pacheco Díaz. Redacción Ingeniería Civil.
Jose.C.Pacheco@cedex.es

Introducción

La actualidad de la figura de Lucio del Valle, de cuyo nacimiento se cumple el bicentenario este año, ha sido oportunamente puesta de relieve con motivo de la celebración de la III Edición de la Semana de la Ingeniería de Caminos de Madrid (SICMA), organizada por la Demarcación de Madrid del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en marzo de 2015. Comisariada por Inmaculada Aguilar y César Díaz-Aguado, dentro de una exposición que fue presentada en las Arquerías de Nuevos Ministerios (Madrid), la muestra ha sido una oportunidad, además de una sobresaliente aportación, para seguir ahondando en el conocimiento de la personalidad y obra de Lucio del Valle, una de las figuras más emblemáticas y polifacéticas de la ingeniería civil española del siglo XIX.

Uno de los más destacados ingenieros de Caminos decimonónicos, la vida y trayectoria profesional de Valle recorre una buena parte del siglo XIX español, con lo que resultaría ciertamente difícil desligar su personalidad y trabajo del contexto histórico y social al que perteneció. Al fin y al cabo, como ha observado el historiador Juan Pablo Fusi en una definición de inspiración claramente *orteguiana*, la biografía de una persona es “un estudio de la condición humana en una circunstancia histórica.” Siendo esto así, no es menos cierto que la biografía de un artista, de un creador, es en rigor su propia obra al reflejar ésta una manera de ser, una experiencia vital y, sobre todo, una forma personal de entender la belleza. Pues bien, la obra del ingeniero Valle –un “verdadero artista en las obras públicas,” al decir de los hermanos Echegaray–, es una demostración de todo ello y muchas cosas más, habiendo sabido plasmar como pocos un tipo de belleza funcional que, siendo heredera de la mejor tradición clasicista, estaría también muy presente en vanguardias artísticas posteriores. Igualmente, la claridad de sus ideas, la consistencia de su trabajo y la vocación de servidor público que le era propia, conforman sin duda alguna una de las contribuciones individuales más importantes a la modernización y articulación del Estado español contemporáneo.

Imbricada en su tiempo, la obra de Valle constituye asimismo un magnífico exponente del prodigioso desarrollo que experimentó la ingeniería civil a partir, sobre todo, de 1840. Se inicia a partir de ahora una auténtica edad de oro para los ingenieros de Caminos, cuyo asentamiento definitivo como colectivo profesional estuvo siempre estrechamente vinculado a la evolución del liberalismo español durante la época isabelina, como ha puesto de relieve Marc Ferri en *El ejército de la paz: los ingenieros de caminos en la instauración del liberalismo en España (1833-1868)*, de 2015.

1. Años de formación en una nación en convulsión

Lucio del Valle y Arana vino al mundo el 2 de marzo de 1815 en Madrid. Su padre, Manuel Antonio del Valle, fue un próspero comerciante de ultramarinos de origen burgalés, mientras su madre, Manuela Arana, procedía de un pueblo de la provincia de Guipúzcoa. Su formación básica consistió, antes de iniciar estudios de arquitectura e ingeniería en la década de los treinta, en el estudio de una amplia gama de asignaturas que fueron cursadas, según el biógrafo Sáenz Ridruejo, en diferentes lugares y colegios religiosos (Colegio de los Agustinos de doña María de Aragón y Colegio Imperial de los Jesuitas), y que iban del Latín a la Geografía, de la Retórica y la Poética a la Física y las Matemáticas – en esta última disciplina destacó muy especialmente, siendo nombrado profesor por la Inspección General de Instrucción Pública cuando apenas contaba con 16 años–, de la Filosofía Moral a la Lógica y de la Química a la Botánica, sin descuidar el conocimiento de inglés, francés o italiano.

España ya era entonces un país caracterizado por una crónica inestabilidad política, que se extendería prácticamente hasta la llegada del último cuarto de siglo. También por un inusitado grado de endémica devastación material generado como consecuencia de la invasión del país por las tropas de Napoleón en 1808.

Para España estos acontecimientos fueron realmente catastróficos –la primera Escuela de Caminos, inaugurada en 1802, fue cerrada en 1808 y colocó a un número importante de ingenieros, francófilos por formación e ideología, en una difícil tesitura profesional–, porque instalaron al país en una larga y profundísima crisis que se prolongaría hasta, al menos, principios de la década de 1840, tras la finalización de la Primera Guerra Carlista (1833-1840); y que es también cuando, al ser trasladado a Valencia, Valle da comienzo al primero de sus grandes proyectos. Antes de ello, sin embargo, el país pasaría por un primer período compuesto por diferentes etapas que, sintéticamente, se pueden cronológicamente resumir así: la eclosión liberal de Cádiz que culminó con la aprobación de la Constitución de 1812, piedra de toque del constitucionalismo español (1810-1812); el restablecimiento del absolutismo en la figura de Fernando VII (1814-1820); el Trienio liberal (1820-1823), durante el cual se abrió la segunda Escuela de Caminos; la Década ominosa con la vuelta de Fernando VII, que para los ingenieros, por ser un cuerpo progresista, supuso una década de postergación (1823-1833); y finalmente la regencia de María Cristina (1833-1840), con la que se inicia el reinado de Isabel II, hija de Fernando VII. Este primer gran período del siglo XIX vendría acompañado, asimismo, de la pérdida de prácticamente todo el imperio colonial americano (1810-1825).

Un segundo gran período de aquel reinado, que es cuando se desarrollarían las grandes obras de ingeniería

civil de Valle, comprendería las siguientes fases: la regencia del general Espartero, de signo progresista (1840-1843); mayoría de edad de la reina con predominio de gobiernos moderados (1843-1854); el Bienio progresista (1854-1856); sucesión de gobiernos moderados y unionistas con trasfondo de conspiraciones progresistas y, finalmente, derrocamiento de la monarquía isabelina (1856-1868). Significativamente, durante este período cinco *espadones* –Espartero, O'Donnell, Narváez, Serrano y Prim–, fueron los protagonistas que dominaron la escena política del país. A su vez, la revolución de 1868 fue orquestada por Prim, Serrano y Topete, dando paso así a la primera y efímera experiencia democrática del país (1868-1874). Seis años después, tras el pronunciamiento del general Martínez Campos, la monarquía borbónica era restaurada en la persona de Alfonso XII, hijo de Isabel II.

En conjunto, la impresión que se obtiene de esta trepidante secuencia de acontecimientos es la del anuncio de cambio y sustitución del Antiguo Régimen por otro nuevo, en un proceso lento, no exento de altibajos, y que tuvo su manifestación en tres hechos fundamentales de largo alcance que sobrepasan las delimitaciones estrictamente cronológicas del período aquí estudiado: un Estado falto de vertebración, raquíptico e ineficiente, y con escasa capacidad de nacionalización, según la tesis sostenida por el historiador Álvarez Junco en uno de sus más conocidos ensayos, *Mater Dolorosa: la idea de España en el siglo XIX* (2001); una revolución liberal que no terminó de completarse y un ejército politizado que se convirtió en promotor y actor decisivo de cambio político –pretorianismo–. Y todo ello, además, dentro del marco de una sociedad predominantemente rural, recorrida por acentuados particularismos, que presentaba abrumadoras tasas de analfabetismo e importantes carencias en términos de capital financiero y tecnológico, y en donde la influencia de la Iglesia era preponderante.

Éste era, a grandes rasgos, el abigarrado tapiz histórico-político y social –tan vívidamente descrito, por lo demás, en los excelentes *Episodios Nacionales* de Benito Pérez Galdós–, contra el que, a través de las décadas centrales del siglo XIX, se desplegó el brillante quehacer profesional del ingeniero Valle, tras unos primeros años, como hemos visto, de formación técnica y humanista. Formación que se prolongaría a lo largo de la década de los treinta cuando inició los estudios de Arquitectura en 1832, estudios que no dudó en interrumpir para incorporarse, dos años más tarde, a la Escuela de Caminos, en donde como era previsible no tardó en destacar: en el curso 1836-37 fue elegido por la Junta de Profesores de Caminos para que ocupara la Cátedra de Geometría Descriptiva, y en 1839, poco después de terminar la carrera, fue nombrado profesor de Topografía y Geodesia en la misma Escuela de Caminos. A nivel más general de consolidación del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, esta década fue también trascendental por varias razones: el establecimiento de la Dirección General de Caminos en 1833, la reapertura de la Escuela de Caminos unos meses más tarde, en 1834, y la implantación del Reglamento del Cuerpo en 1836.

2. Etapas de madurez: el ingeniero Valle a través de su obra, una forma de entender la modernidad

En 1840, poco antes de partir hacia Valencia para tomar posesión como ingeniero subalterno, Valle había sido aceptado como arquitecto en la Academia de Nobles Artes de San Fernando. Ya establecido en Valencia a partir de aquel año, en donde permanecería por el resto de la década –una década decisiva en la que, según el ya citado Sáenz Ridruejo, “los ingenieros de Caminos pudieron aplicarse con plena efectividad en la labor técnica que les estaba encomendada”– Valle dedicaría sus esfuerzos a ejecutar la construcción, en la carretera que iba de Madrid a Valencia, del tramo conocido como de las Cabrillas. La progresión de esta primera gran obra a cargo de Valle vio, en un primer estadio, la apertura al tráfico en 1842 de la sección situada entre el Pontón de la Legua y la Venta de la Mina para, tres años más tarde, permitir que se acometieran los trabajos del puente sobre el río Júcar. Habría que esperar no obstante hasta 1851 para ver terminado el paso del río Cabriel, de gran dificultad técnica, con las cuestas de Contreras y el puente apodado “ciempiés.”

Este trabajo, sin duda uno de los más conocidos de Valle, le mereció un reconocimiento oficial en forma de lápida que, todavía hoy, puede contemplarse sobre la clave del puente. Además de aquél, Valle realizó encargos como la elaboración del proyecto del puerto de Cullera, y de la carretera entre Valencia y Cullera (1847), o sus trabajos en la acequia de Murviedro, que le valieron la Cruz de Isabel la Católica. Redactó también, dadas sus convicciones religiosas y viva sensibilidad social, el *Reglamento especial para los presidios de obras públicas* (1843); esta sentida y constante preocupación tendría, no casualmente, continuidad diez años más tarde cuando el primer número de *Revista de Obras Públicas*, de 1853, se abrió con un artículo en el que Valle reflexionaba sobre los beneficios sociales del trabajo que realizaban los presidiarios.

Paralelamente, Valle iba acumulando nombramientos y menciones honoríficas (académico de la Academia de San Carlos, de la sección de arquitectura de la Academia de San Fernando, de la de Bellas Artes de Valencia, secretario de Su Majestad), lo que es sin duda un claro testimonio de la sólida reputación que el ingeniero Valle iba ganando.

De vuelta en Madrid a principios de la década de 1850 –una década de extraordinaria actividad para la ingeniería civil con la incesante construcción de puentes, carreteras, faros, ferrocarriles, presas, etcétera–, Valle se embarca, en labores de dirección, en la que sería una de sus mayores consecuciones y que, como la mayoría de sus trabajos, daba respuesta técnica a una necesidad social, cual era garantizar con suficiencia el abastecimiento de agua a la ciudad de Madrid. Se trataba, en efecto, de la traída de agua desde el distante río Lozoya hasta Madrid, un proyecto finalmente aprobado e impulsado por Bravo Murillo en 1851, y que supuso la ejecución de una obra de enorme envergadura técnica para la que se ensambló un equipo profesional con algunos de los mejores ingenieros de la época; dentro de este equipo no tardó en descollar la personalidad y el liderazgo de Valle,



Canal Isabel II. Obreros en la presa del Pontón de la Oliva (1855-1858). Fotografía de Charles Clifford. Colección Particular



Retrato de Lucio del Valle (1860). Archivo Lucio del Valle

quien durante la realización de las obras dio en todo momento notorias muestras de compañerismo, imaginación, determinación, optimismo y una titánica capacidad de trabajo. Su buen hacer quedó rubricado en los acueductos de La Sima, La Retuerta, Colmenarejo y Las

Cuevas; como así también su tenacidad y capacidad de resolución en intentar atajar las filtraciones surgidas en la presa del Pontón de la Oliva, cuyo origen estuvo, acaso, en la elección del enclave de la cerrada, que se suponía impermeable y resultó no serlo. Finalmente, las obras en Madrid se inauguraron en junio de 1858, en presencia de Isabel II, con la instalación de una fuente en la calle San Bernardo, frente a la iglesia de Montserrat. Por su trabajo en este proyecto Valle recibió la Gran Cruz y Banda de Carlos III.

Otro importante trabajo de estos años, vinculado al anterior, consistió en las obras de remodelación y ampliación de la Puerta del Sol de Madrid, proyecto impulsado por el Gobierno moderado de Narváez (1856-1858), y encargado por éste a los ingenieros Lucio del Valle, Juan Rivera y José Morer. Este proyecto, que se hacía eco a su vez de un tímido proyecto general de mejoras esbozado por Mesonero Romanos en 1846, perseguía en esencia un doble objetivo: ir dando satisfacción a las necesidades de crecimiento urbano de Madrid, por un lado y, por otro, aprovechar la ocasión para equiparar a esta última con otras grandes ciudades europeas del momento. Las obras culminarían exitosamente en 1861, legando una configuración final que ha permanecido inalterada hasta nuestros días, esto es, una superficie de poco más de 12.000 metros cuadrados rodeada por edificios de cuatro plantas. Todo un referente que no dejaría de influir en obras subsiguientes y que se convertiría con el paso del tiempo en el símbolo viviente de toda una época.

Entrando en lo que puede considerarse la última parte de su vida, Valle siguió trabajando en comisiones oficiales, una de las cuales implicó un viaje a Francia e Inglaterra para recoger información sobre puertos y servicios marítimos. Basándose en esta experiencia, Valle elaboró las conocidas como *Memorias sobre el alumbrado y servicio marítimo* (1861), en las que daba cuenta de las últimas novedades tecnológicas en este campo (faros lenticulares, uso de faros con luz eléctrica, etcétera).

Simultáneamente, y con las demandas que imponía una creciente industrialización en las formas de transporte con la introducción de la máquina de vapor, se hizo prioritario iluminar localizaciones como el Delta del Ebro, un espacio físico que registraba ya entonces una intensa actividad comercial. Como era previsible dados sus conocimientos, y encontrándose todavía en Gran Bretaña, Valle fue el encargado de proyectar la construcción de tres faros en dicho enclave: uno al sur del Delta, en la Baña, otro en la Isla de Buda y un tercero en el extremo del Fangar, al norte. De los tres, el de Buda fue con diferencia el más novedoso: con piezas de hierro fundido procedentes de Inglaterra, el faro constituía una formidable torre metálica de 51,5 metros de altura, la más alta del mundo por aquel entonces, 1864, y sin duda uno de los mayores éxitos profesionales del ingeniero Valle.

Una importante faceta de la actividad de Valle desarrollada en estos años fue el uso de la fotografía, que cultivó asiduamente con la colaboración de algunos de los más notables fotógrafos de aquellos años –Clifford, Laurent, Baldus, Collard, Braun-. Gracias a ello pudo Valle formar colecciones de gran calidad técnica que se exhibieron en las Exposiciones Universales del momento, siendo la más importante la celebrada en París en 1867.



Puerta del Sol hacia finales del siglo XIX. Archivo Lucio del Valle

En manos de Valle la fotografía se convirtió, empero, en algo más que una simple herramienta de trabajo: fue un insustituible medio gráfico con el que Valle divulgó el trabajo que realizaban los ingenieros y, por ende, con el que resaltó el valor de la modernidad en la construcción de la imagen del país, lejos de los estereotipos y de ese orientalismo exótico que los viajeros románticos esperaban encontrar en España.

De otro lado, y en lo que se había convertido en una tónica habitual, Valle continuó recibiendo otros nombramientos y menciones (académico de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, académico de número de la de Nobles Artes de San Fernando, director de las Escuelas de Caminos y Arquitectura, presidente de la Junta de Obras de la Biblioteca Nacional, presidente de la Comisión de Faros, Caballero de la Gran Cruz de la Orden Civil de María Victoria, etcétera), y así hasta julio de 1874, cuando Valle fallece dejando tras de sí algo más que un recuerdo, como José Echegaray no dejó de recordar por boca de su hermano Eduardo: “[...] dejando en el cuerpo de caminos un vacío difícil de llenar, y llevándose al otro mundo el respeto y cariño de sus amigos y compañeros.”

3. Lucio del Valle como modelo

Cabría señalar, para terminar, que son muchas y muy fructíferas las lecciones que se pueden extraer del ejemplo personal y la obra de una personalidad como la de Valle. Una es la que tiene que ver con los riesgos de la especialización. Valle fue, en efecto, una inteligencia viva, bien formada en varios y diversos campos que aspiró, como hombre de ciencia, a resolver los problemas técnicos que en diferentes épocas de su vida tuvo que enfrentar. Esta amplitud de miras con clara vocación interdisciplinar queda más bien lejos de la figura del técnico especializado de nuestros días, de ese desapasionado “hombre científico sin espíritu” -tal y como lo describiera Max Weber en las páginas finales de su obra *La ética*

protestante y el ‘espíritu’ del capitalismo (1904)-, que se dedica únicamente a la rama de su saber sin sentir la más mínima curiosidad por cultivar otro tipo de intereses intelectuales.

En otro orden, su sentido de la belleza y la armonía y del impacto en la naturaleza de la acción humana, hizo de Valle un adelantado de su tiempo en términos de protección medioambiental. Invariablemente, sus proyectos están recorridos por una doble y constante preocupación: dar una respuesta racional a un problema técnico derivado de una necesidad humana, por un lado y, por otro, hacer simultáneamente realidad un sentido de la estética que hiciera posible que hombre y naturaleza se conjuntaran en apacible armonía.

Con todo, la enseñanza más valiosa que ofrece el ejemplo de un español eminente como Valle es el extraordinario activo que representa la educación, ampliamente entendida, como pilar básico de una carrera dedicada íntegramente al servicio público del Estado. En este sentido, primero como aventajado alumno y joven profesor, y luego como académico y director de las Escuelas de Caminos y Arquitectura, la trayectoria del ingeniero Valle constituye un permanente recordatorio de la importancia de disponer de un sistema de educación y de investigación de primera calidad, como base de una ciencia concebida desde la riqueza de todas sus posibilidades. “Un país civilizado”, proclamó Valle, “debe poseer la ciencia en toda su extensión, desde las más elevadas abstracciones del conocimiento puro, hasta las últimas aplicaciones prácticas e industriales.”

Siempre prevaleció en él, pues, una honda preocupación por la enseñanza como instrumento insustituible con el que conjugar la teoría y los estudios de aplicación. Esta cualidad y otras no menos importantes, sobre las que se cimentaron la autoridad y calidad humana de Lucio del Valle, fueron apreciadas por sus contemporáneos, que no dejaron de granjearle con toda justicia todo tipo de reconocimientos.

REFERENCIAS DE ARTÍCULOS PUBLICADOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS POR PERSONAL DEL CEDEX

Título: Benefits and limitations of an intercalibration of phytoplankton assessment methods based on the Mediterranean GIG reservoir experience

Autores: **Pahissa, J.***; Catalan, J.; Morabito, G.; Dorflinger, G.; Ferreira, J.; Laplace-Treyture, C.; Girbea, R.; Marchetto, A.; Polykarpou, P.; **de Hoyos, C.***

En: Science of the Total Environment (2015), 538:169-179.

* Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX.

Título: Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil

Autores: Coulier, P; **Cuellar, V.***; Degrande, G.; Lombaert, G.

En: Soil Dynamics and Earthquake Engineering (2015), 77:238-253.

* Laboratorio de Geotecnia, CEDEX.

Título: Water balance and flow rate discharge on a receiving water body: Application to the B-XII Irrigation District in Spain

Autores: **Moyano, MC.***; **Tornos, L.***; Juana, L.

En: Journal of Hydrology (2015), 527:38-49.

*Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX.

Título: Overtopping of harbour breakwaters: a comparison of semi-empirical equations, neural networks, and physical model tests

Autores: **Rodriguez Gil, Angeles M.***; **Sanchez Gonzalez, Jose F.***; **Gutierrez Serret, Ramón***; Negro Valdecantos, Vicente]

En: Journal of Hydraulic Research (2015), 4:505-518.

*Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX.

Título: Fractal Dimension of the Hydrographic Pattern of Three Large Rivers in the Mediterranean Morphoclimatic System: Geomorphologic Interpretation of Russian (USA), Ebro (Spain) and Volturno (Italy) Fluvial Geometry

Autores: Donadio, Carlo; **Magdaleno, Fernando***; Mazzarella, Adriano; Kondolf, G. Mathias.

En: Pure and Applied Geophysics (2015), 7:1975-1984

*Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas, CEDEX.

Título: Application of the logit model for the analysis of asphalt fatigue tests results

Autores: **Mateos, Angel***; Antonio Gómez, Jose; Hernández, Roberto; Tan, Yiqiu; Loria Salazar, Luis Guillermo; Vargas-Nordbeck, Adriana.

En: Construction and Building Materials (2015), 82:53-60

*Centro de Estudios del Transporte, CEDEX.

Título: A landscape-based regionalization of natural flow regimes in the Ebro basin and its biological validation

Autores: Solans, M. A.; **Mellado-Diaz, A.***

En: River Research and Applications (2015), 4:457-469

*Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX.

Título: Assessment of MODIS spectral indices for determining rice paddy agricultural practices and hydroperiod

Autores: **Tornos, Lucia***; Huesca, Margarita; Antonio Dominguez, Jose; **Carmen Moyano, Maria***; Cicuendez, Victor; Recuero, Laura; Palacios-Orueta, Alicia.

En: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (2015), 101:110-124.

*Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX.

Título: An accelerated test to assess the quality of recycled concrete sands based on their absorption capacity

Autores: **Rueda, Jorge***; **Dapena, Enrique****; **Alaejos, Pilar***; **Menendez de Llano, Susana***

En: Construction and Building Materials (2015), 78:464-469

*Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, CEDEX.

**Laboratorio de Geotecnia, CEDEX.

Título: Comparative analysis of two weight-of-evidence methodologies for integrated sediment quality assessment

Autores: Khosrovyan, A.; Rodriguez-Romero, A.; **Antequera Ramos, M.***; DelValls, T. A.; Riba, I.

En: Chemosphere (2015), 120:138-144.

*Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX.

Título: Improvement of theoretical storm characterization for different climate conditions

Autores: **Martin Soldevilla, M^a Jesus***; **Martin-Hidalgo, Melva***; Negro, Vicente; Lopez-Gutierrez, J. S.; **Aberturas, Paloma***

En: Coastal Engineering (2015) 96:71-80.

*Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX.

Título: *The Prediction of Vibration Transfer for Railway Induced Ground Vibration*

Autores: Verbraken, H.; Veirman, N.; **Cuellar, V.***; Lombaert, G.; Degrande, G.*

En: Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems (2015), 126:245-252.

*Laboratorio de Geotecnia, CEDEX.

Título: *Validation of a dynamic modulus predictive equation on the basis of Spanish asphalt concrete mixtures*

Autores: **Mateos, A.***; Soares, J. B.

En: Materiales de Construcción (2015), 317

*Centro de Estudios del Transporte, CEDEX.

Título: *Depth Averaged Models for Fast Landslide Propagation: Mathematical, Rheological and Numerical Aspects*

Autores: Pastor, M.; Blanc, T.; Haddad, B.; Drempevic, V.; Sanchez Morles, Mila; Dutto, P.; Martin Stickle, M.; **Mira, P.***; Fernandez Merodo, J. A.

En: Archives of Computational Methods in Engineering (2015), 1:67-104

*Laboratorio de Geotecnia, CEDEX.

APORTACIONES DEL CEDEX A CONGRESOS, JORNADAS Y PUBLICACIONES

Reunión Anual de Red ALERT Geomaterials

Aussois, Francia, del 27 septiembre al 3 octubre de 2015.

Asistencia a la Reunión.

Seminario "Gestión de Pesca"

León, España, 6 de octubre de 2015.

Asistencia a la jornada y presentación de ponencia en el Seminario relativa a trabajos de restauración de hábitats fluviales desarrollados por el CEDEX.

I Congreso transfronterizo sobre Cambio Climático y Litoral. UHINAK.

Irún, España, el 6 y 7 de octubre de 2015.

Asistencia y presentación ponencia invitada "Vulnerabilidad, Impactos y adaptación en los entornos litorales construidos".

Jornadas sobre drones

San Fernando de Henares, Madrid, España, 7 de octubre de 2015.

Asistencia a la jornada.

Congreso Test4Rail

Braunschweig, Alemania, del 13 al 16 de octubre de 2015.

Asistencia como ponentes al Congreso Test4Rail organizado por el laboratorio alemán DLR, socio del CEDEX en todos los proyectos financiados con fondos Europeos para la consolidación del sistema ERTMS.

IV Jornadas de Ingeniería del Agua

Córdoba, España, el 21 y 22 de octubre de 2015.

Asistencia y presentación de dos artículos enviados sobre trabajos realizados en el Laboratorio de Hidráulica del CEH recientemente.

Jornada "Tecnología de membranas."

Madrid, España, el 28 y 29 de octubre de 2015.

Asistencia a la jornada.

25º Congreso Mundial de la Carretera

Seúl, Corea del Sur, del 1 al 6 de noviembre de 2015.

Asistencia al congreso y presentación del trabajo "Gestión de carreteras en Latinoamérica y España".

XXV Aniversario del Grupo de Usuarios ERTMS

Bruselas, Bélgica, del 11 al 12 de noviembre de 2015.

Asistencia al vigésimo aniversario del Grupo de Usuarios ERTMS. D. Jaime Tamarit, actual director del Laboratorio de Interoperabilidad del CEDEX, ha sido el Director General del grupo con más larga permanencia: Siete años entre Febrero 2001 y Agosto 2007. Desde allí potenció los grupos de trabajo españoles, especialmente la línea piloto ERTMS de ADIF/RENFE entre Albacete y Villar de Chinchilla y los laboratorios ERTMS del CEDEX.

Congreso BCN Rail

Barcelona, España, del 17 al 18 de noviembre de 2015.

Asistencia como ponente en la sesión inaugural. EL Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria figura como coordinador de los temas de interoperabilidad Ferroviaria en la Plataforma Ferroviaria organizada por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles y siempre ocupa un lugar prominente en los eventos de la Plataforma organizados por la Fundación. el LIF presentará una comunicación sobre los ensayos de laboratorio para la puesta en servicio de los Niveles 1 y 2 ERTMS en la línea C4 de Cercanías de Madrid.

Sixth Symposium on Polar Science

Tokyo, Japón, del 16 al 19 de noviembre de 2015.

Invitación para impartir una conferencia sobre los estudios limnológicos llevados a cabo por el CEDEX en la Península de Byers (Isla Livingston, Antártida).

Iberian Workshop Advances on Smoothed Particle Hydrodynamics

Orense, España, del 25 al 26 de noviembre de 2015.

Asistencia, participación y presentación de los trabajos anteriores y desarrollar los futuros de Iberian SPH Workshop, dedicado a la técnica "Smoothed Particles Hydrodynamics" y sus aplicaciones en Ingeniería Marítima e Hidráulica.

XVI reunión de la Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua (CODIA)

Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, del 7 al 11 de diciembre de 2015.

Asistencia a la reunión.