# Ingeniería Civil

NÚM. 172/2013

ISSN: 0213-8468

GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE FOMENTO

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS

# Más que agua

Por un año lleno de ilusión, buenas ideas, innovación y desarrollo sostenible.
Nuestro deseo, entre todos, lo hacemos realidad.

Feliz 2014

AQUALOGY
Where Water Lives

SOLUCIONES INTEGRADAS DEL AGUA PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE

www.aqualogy.net

# Ingeniería Civil

NUM. 172 - OCT.NOV.DIC. - 2013

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

Publicación incluida en el programa Editorial para 2013

MINISTERIO DE FOMENTO

SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

CENTRO DE PUBLICACIONES



COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidente

Miguel González Portal

Vocales

Enrique Dapena García
Víctor Elviro García
Antonio Lechuga Alvaro
Pablo Mira McWilliams
Mª Angeles de Pablo Sanmartín
Francisco Javier Sainz de Cueto Torres
Francisco Sinis Fernández
Jaime Tamarit Rodríguez

Secretaría

Ana García Neri
Alejandro D. Martos Rodríguez
Olga Sánchez de la Torre



REDACCIÓN

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid - Telf.: 913 35 72 69 - Fax: 913 35 72 49
e-mail: ingcivil@cedex.es



El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) no se hace responsable de las opiniones, teorías o datos publicados en los artículos de Ingeniería Civil, siendo ello responsabilidad exclusiva de sus autores.



COORDINACIÓN DE PUBLICIDAD

Manuel Pombo Martínez

PUBLICIDAD

Orense, 6 - Telfs.: 915 55 36 93 - Fax: 915 56 40 60 - 28020 Madrid
e-mail: revistacivil@gmail.com

PRECIO DE ESTE EJEMPLAR: 12,25€

I.S.S.N.: 0213-8468 - N.I.P.O.: 163-13-003-5
Depósito Legal: M-28150-1971 - AUTOEDICIÓN Y PUBLICIDAD

**NUESTRA PORTADA:** Evaluación de la seguridad y protección de las presas de materiales sueltos en situación de sobre vertido. Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX.

# SUMARIO


INTERPRETACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA "ADZ" POR UN PROCEDIMIENTO DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN CON EL COEFICIENTE DE TRANSPORTE FUNCIÓN DEL TIEMPO.
Alfredo José Constain Aragón 3

ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA EN CALIFORNIA (USA): QUINTA PARTE (V) LAV SAN FRANCISCO–SACRAMENTO (BAY CROSSING ALTERNATIVE)
*HIGH SPEED RAILWAY IN CALIFORNIA (USA): FITH PART (V) HSRL SAN FRANCISCO– SACRAMENTO (BAY CROSSING ALTERNATIVE).*
Manuel Díaz del Rio Jáudenes, Luis Fort López–Tello y Carmen Fort Santa–María 15

SIFONES REGULADOS PARA VERTIDO ANTICIPADO EN AVENIDAS.
Tamara Ramos del Rosario, Mª Dolores Cordero Page, Víctor Elviro Gracía y Cristóbal Mateos Iguácel 39

EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE $CO_2$ DEL TRÁFICO POR CARRETERA (HERRAMIENTA $CO_2$TA).
Laura Crespo García y Fernando Jiménez Arroyo 45

ANÁLISIS INTEGRAL DE CAUCES USANDO TRAZADORES: UN PROCEDIMIENTO ÓPTIMO DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA.
Alfredo José Constain Aragon y Jorge Luis Corredor Rivera 59

EVOLUCIÓN DE LAS MEDIDAS COMPENSATORIAS EN LOS PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.
María José Carrasco García, Álvaro Enríquez de Salamanca Sánchez-Cámara, Manuel R. García Sánchez-Colomer y Sarah Ruiz Arriaga 73

ANÁLISIS DE ENSAYOS DE CARGA EN PILOTES DE GRAN DIÁMETRO EN POLONIA Y PROPUESTA DE CORRELACIONES A UTILIZAR PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDADES PORTANTES.
Juan-Alfonso Carcolé Galea y Ana María Aguilar Bauza 81

PÉRDIDAS DE ENERGÍA DEL FLUJO EN MEDIOS GRANULARES.
Ángel Lara Domínguez, Rafael Cobo Rayán, Mª Pilar Viña Gómez y Francisco García Sánchez 97

PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS FIRMES DE CARRETERA A TRAVÉS DE PARÁMETROS CLIMÁTICOS.
Belén Cadavid Jáuregui y Javier Pérez Ayuso 109



***En la página 129 y en nuestra web <www.cedex.es> encontrará las normas para la publicación de artículos***



Papel reciclado postconsumo

# EDICIONES DEL CEDEX

## GUÍA TÉCNICA SOBRE REDES DE SANEAMIENTO Y DRENAJE URBANO

La Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano es un documento cuyo objetivo es ordenar el estado del arte en la materia y servir de guía al usuario de las redes de saneamiento y drenaje en la aplicación de la muy abundante e inconexa normativa al respecto. El ámbito de aplicación es de las redes de saneamiento y drenaje, independientemente de cual sea su funcio- namiento hidráulico (en lámina libre, bajo presión o por vacío), o su concepción (unitarias o separativas). Quedan excluidos expresamente los emisarios submarinos y las estaciones depuradoras. Tampoco son objeto de la guía las instalaciones de recolección de las aguas residuales y pluviales en el interior de los edificios, ni las conducciones de drenaje de las obras lineales.

**Nº de páginas: 635**
**Año de edición: 2009**
**Reimpresión: 2013**
**P.V.P.: 48€**

**Nº de páginas: 335**
**Año de edición: 2012**
**P.V.P.: 30€**

## GUÍA TÉCNICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS ACTUACIONES A CONSIDERAR EN PLANES HIDROLÓGICOS Y ESTUDIOS DE VIABILIDAD

La Guía caracteriza medidas que se pueden implementar para la consecución de los objetivos establecidos en planes hidrológicos de cuenca con un grado de detalle correspondiente a la fase de planificación, estudio de viabilidad o incluso anteproyecto. Para cada medida se aporta, siempre que su naturaleza lo permite, una descripción básica y una metodología para la estimación de sus costes y sus efectos. El objetivo ha sido disponer de unos procedimientos que pudieran ser de aplicación en la definición de los programas de medidas cuyo resumen deben incluir los planes hidrológicos de cuenca revisados tras la incorporación al ordenamiento jurídico español de la Directiva 2000/60/CE (Directiva marco del agua). En la Guía se abordan 35 de las medidas reseñadas en la Instrucción de Planificación Hidrológica, aprobada por Orden ARM/2656/2008 de 10 de septiembre, como de aplicación no exclusiva en aguas costeras y de transición. Las actuaciones consideradas incluyen en primer lugar medidas básicas destinadas a la aplicación de la legislación de protección del agua (relacionadas especialmente con el tratamiento de aguas residuales) y al fomento del uso eficiente y sostenible del recurso. En segundo lugar, medidas complementarias tales como infraestructuras básicas regeneración, desalación, regulación y transporte) y medidas de carácter esencialmente ambiental (restauración hidrológico-forestal, de ríos y de zonas húmedas). No se han contemplado las medidas de ámbito específicamente agrario, asociadas fundamentalmente a la modernización de regadíos.

## Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid
Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: +(34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

# Interpretación de los parámetros de la metodología "*ADZ*" por un procedimiento de advección-dispersión con el coeficiente de transporte función del tiempo

**ALFREDO JOSÉ CONSTAIN ARAGÓN (*)**

**RESUMEN** Los modelos de calidad de aguas son estructuras matemáticas y conceptuales en las que es posible predecir el comportamiento de diferentes aspectos de la dinámica de solutos o contaminaciones, dada una cierta información de entrada y unas ecuaciones básicas del modelo. Un grupo importante de metodologías dentro del estado del arte son las denominadas de Advección-dispersión (*ADE*), Almacenamiento Transitorio (*TS*) y de Zona Muerta Agregada (*ADZ*). La primera es la teoría básica mientras las segundas se caracterizan por un retraso de las partículas de soluto, que se almacenan temporalmente en las zonas periféricas de baja velocidad, llevando a modificar la forma de la curva de concentración.
En este articulo se presenta de forma reducida una variación de la teoría clásica *ADE* en la que el Coeficiente Longitudinal de dispersión se toma como una función del tiempo, con el fin de eliminar una serie de problemas que fueron señalados para la teoría inicial. Estos nuevos desarrollos son aplicados a calcular los parámetros básicos de la teoría *ADZ* de zonas muertas, mostrando su gran poder de cálculo. Esta solución es aplicada a un caso experimental con resultados satisfactorios.

## INTERPRETATION OF "*ADZ*" METHODOLOGY PARAMETERS BY AN ADVECTION-DISPERSION PROCEDURE WITH TRANSPORT COEFFICIENT AS TIME FUNCTION

**ABSTRACT** *The quality of water models are mathematical and conceptual structures in which is possible to predict the behavior of different issues of solutes or contaminants, given certain input information and a basic model equations. An important group of methodologies in the state of the art are the so-called Advection- Dispersion Equation (ADE), Transient storage (TS) and Aggregated Dead Zone theory (ADZ). First is the basic theory meanwhile seconds are characterized by a delay of solute particles, which are transient stored in peripheral low velocity zones, leading to modify the shape of concentration curves.*
*In this article it is presented in a reduced form a variation of classic theory ADE in which Longitudinal Dispersion Coefficient is taken as a time function, with the aim of eliminate a series of problems which was stated to original theory. These new developments are applied to calculate the basic parameters of ADZ theory of dead zones, showing its great power. This solution is applied to an experimental case with satisfactory results.*

***Palabras clave:*** Metodologías de Transporte de masa, Cinemática, Modelación con trazadores.

***Keywords:*** Mass transport methodologies, Kinematics, Tracer modelation.

## 1. METODOLOGÍA *ADE*

La ecuación diferencial básica de la teoría Advección-Dispersión *ADE*, se presenta enseguida siendo válida para una descripción mono-dimensional con un trazador conservativo (sin fuentes ni sumideros de masa).

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

(*) Ingeniero especialista. Gerente Hydrocloro Ltda, Bogotá, Colombia. Director I+D Amazonas Technologies, Cali, Colombia.
E-mail: alfredo.constain@gmail

Como su nombre lo indica se considera explícitamente independientes los términos de adveccion (dependiente del movimiento macroscópico del flujo) y de dispersión (dependiente de las fluctuaciones). Su solución es la bien conocida función de Fick (2) que describe el comportamiento de la concentración promedio en el plano móvil asociado al centro de masa de la pluma, donde $A$ es el área de la sección transversal del flujo y $M$ es la masa de trazador vertida súbitamente.

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

Estas dos expresiones básicas del transporte de masa, además de requerir que el trazador llene uniformemente la sec-

ción transversal implican que el coeficiente longitudinal de dispersión, $E$, sea constante para que el transporte dispersivo por fluctuaciones no dependa sino del gradiente de concentración (si $E$ fuese una variable habría un factor extra de variación –diferente al gradiente mismo–). Esta consideración lleva a imponer la condición adicional de flujo uniforme, para el cual $E$ es constante.

Dos graves problemas aquejan al modelo original de Taylor-Fick:

1. La "altura" (concentración pico) de las curvas experimentales no es replicado correctamente por la ecuación (2) y;
2. La asimetría de las curvas tampoco es descrita apropiadamente por la de Fick (2) especialmente en las etapas iniciales de la evolución de la pluma de trazador. (Jobson H.B. 1996).

## 2. METODOLOGÍA ZONA MUERTA AGREGADA (*ADZ*)

Desarrollada en 1983 (Beer y Young, 1983) (Runkel, 1998) a diferencia del Método *TS*, esta metodología se aparta completamente del esquema *ADE*, tratando de modelar el efecto real de "altura" y "asimetría" por medio de la retención de partículas en zonas de muy baja velocidad, llamadas genéricamente "Zonas muertas". La modificación conceptual principal de esta aproximación es que la mayor contribución a la mezcla dispersiva la produce el intercambio de partículas en las zonas muertas, medida está por el parámetro "Tiempo de residencia", *Tr*, que definirá más adelante. Esto también quiere decir que el mecanismo clásico de Dispersion de Taylor es significativamente menos importante, y por lo tanto cambian drásticamente las ecuaciones que guían el proceso. Se utiliza entonces una ecuación diferencial ordinaria de primer orden sin la participación del Coeficiente de transporte $E$.

Para su representación matemática se parte del hecho de que el balance de masa para un soluto conservativo se describe de la siguiente manera:

$$\frac{d\left[V_a \overline{S(t)}\right]}{dt} = Q(S_u(t-\tau) - S_o(t)) \qquad (3)$$

Con las siguientes definiciones:

$V_a$ = Volumen total de agua en el tramo considerado.

$\overline{S(t)}$ = Concentración promedio de soluto en el tramo.

$S_o(t)$ = Concentración de soluto aguas abajo en el tramo.

$S_u(t)$ = Concentración de soluto aguas arriba en el tramo.

$\tau$ = Tiempo de retraso advectivo.

$Q$ = Caudal de descarga.

Este modelo tiene los supuestos básicos:

Se considera el tramo del cauce como un sistema imperfectamente mezclado en el que se puede identificar por aparte la adveccion pura y la dispersión longitudinal de la nube de soluto. La adveccion pura se caracteriza mediante el parámetro "tiempo de retraso advectivo", $\tau$ y el parámetro *ts* o "tiempo total de viaje del soluto". La dispersión longitudinal se caracteriza mediante la diferencia entre los dos desfases anteriores que se denomina "Tiempo de residencia", *Tr*.

$$Tr = t_s - \tau \qquad (4)$$

La interpretación intuitiva de esta ecuación básica es que el tiempo entre la aparición de las primeras partículas y la aparición efectiva de la masa (en el Centroide de masa o sea en el pequeño círculo blanco) es mayor en tanto haya más dispersión. Por lo tanto *Tr* mide esta característica Figura 1.

En realidad para observar la naturaleza dinámica de estos tiempos (*Tr* va cambiando con el tiempo) se prefiere referirlos a desfases entre los frentes de concentración y entre los centroides de distribución de una misma curva tomada en secuencia. De esta forma se involucra la naturaleza no uniforme de este proceso. Figura 2.

2.- El modelo también asume que la concentración de soluto aguas abajo ("de salida") está relacionada linealmente con la concentración promedio en el elemento de volumen considerado.

$$\overline{S(t)} = k_1 S_o(t) \qquad (5)$$

Aquí k1 es un factor de dispersión que define las características de mezcla del soluto en el tramo. Para una condición de "mezcla perfecta" *k1=1*. También se considera que el volumen completamente mezclado V es una fracción de del volumen total del tramo Va:

$$V = k_1 V_a \qquad (6)$$

También se puede escribir que:

$$\frac{V}{V_a} = \frac{T_r}{t_s} = k_1 \qquad (7)$$

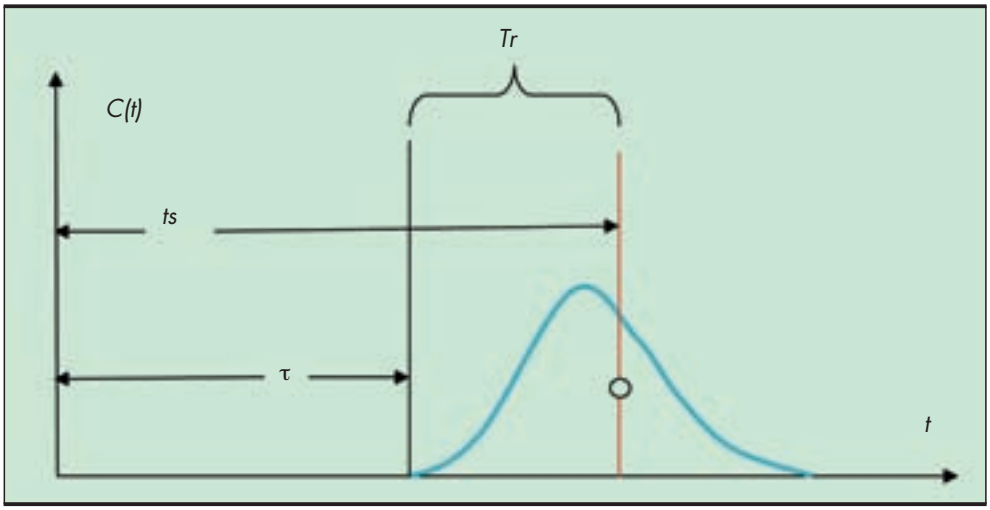



**FIGURA 1.** Definiciones temporales básicas de *ADZ*.

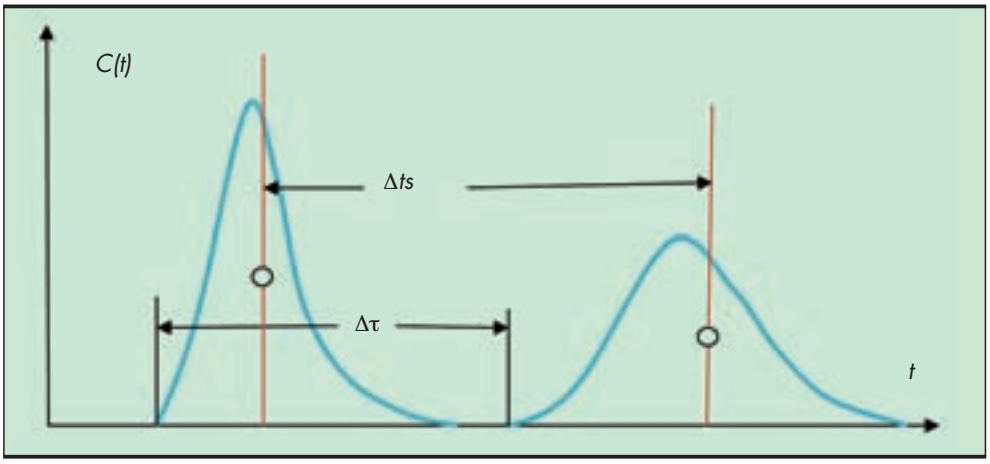



**FIGURA 2.** Cálculo práctico de estas definiciones.

La velocidad de transporte del soluto es a la misma a la cual se mueve el centroide, si $X$ es la distancia considerada, entonces:

$$U_s = \frac{X}{t_s} \tag{8}$$

Esta velocidad se considera menor que la velocidad del flujo debido al efecto de retención por las Zonas muertas periféricas. Se define entonces el coeficiente de retraso del soluto, $\beta$, como:

$$U_s = \frac{U}{(1+\beta)} \tag{9}$$

Aquí $U$ es la velocidad media del flujo. Ahora si se considera que:

$$Q = \frac{V}{T_r} \tag{10}$$

Entonces queda que:

$$\frac{d[S_o(t)]}{dt} = \frac{1}{T_r}(S_u(t-\tau) - S_o(t)) \tag{11}$$

Esto quiere decir que de acuerdo con los autores del modelo, el cambio diferencial en el tiempo para la concentración aguas abajo (salida) se puede relacionar directamente con la diferencia finita en el tiempo de la concentración aguas arriba (entrada) y la propia concentración aguas abajo. La concentración aguas arriba está desfasada en $\tau$ con respecto a la variable independiente $t$ (que cumple en general el papel de *ts)*. El tiempo finito en el que se observa este transporte es el tiempo dispersivo (Tiempo de residencia) *Tr*. Un coeficiente importante en este modelo es la llamada "Fracción dispersiva", definida de las siguientes formas:

$$DF = \frac{V}{S} = \frac{T_r}{t_s} \tag{12}$$

Estas definiciones implican que se mide la razón entre el volumen activo de mezcla, *V,* y el volumen total del tramo para el cauce, *S*. También la razón entre el tiempo de Residencia del trazador y el tiempo asociado al centroide.

## 3. UNA APROXIMACIÓN A LA ADVECCIÓN-DISPERSIÓN USANDO UN COEFICIENTE LONGITUDINAL DE DISPERSIÓN FUNCIÓN DEL TIEMPO

### 3.1. FUNDAMENTOS

Una posible explicación al comportamiento "anómalo" de los modelos clásicos con referencia a las curvas experimentales es

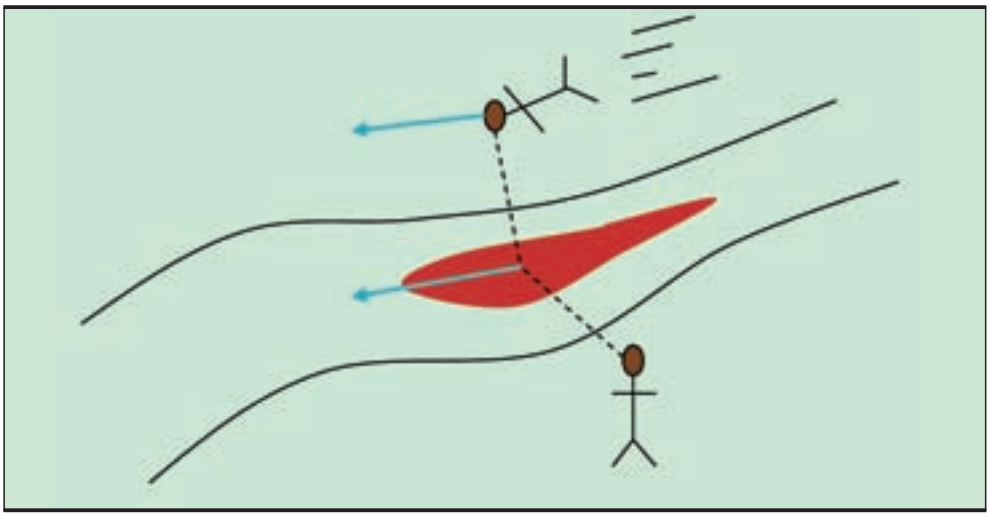


**FIGURA 3.** Dos versiones diferentes del mismo fenómeno.

que se haya incurrido en un problema de interpretación cinemática, ya que dos diferentes observadores verán dos diferentes curvas para la misma nube de trazador. Uno de ellos fijo en la orilla vera una curva *asimétrica* (por la composición de las velocidades dispersivas y la advectiva) y el otro moviéndose con la velocidad media $U$ sobre la pluma la vera estática en su sistema y *simétrica* (por no tener composición de velocidades). Figura 3.

Es posible mostrar que un coeficiente de transporte función del tiempo implica una forma de hacer que las ecuaciones básicas se acomoden a cada caso. En este tipo de análisis físicos siempre aparece la necesidad de definir la razón de las velocidades que se componen, para el trazador en sí mismo y para el flujo en el que evoluciona.

$$\phi(t) = \frac{V_{disp}}{U} \tag{13}$$

También es posible afirmar que $E(t)$ implica una velocidad media del flujo con la siguiente forma

$$U = \frac{1}{\phi(t)}\sqrt{\frac{2E(t)}{\tau}} \tag{14}$$

Aquí $\tau$ es el tiempo característico de dispersión y $\Phi(t)$ es una función que describe el grado de asimetría de la curva de concentración. La función $\Phi(t)$ que aparece en esta ecuación es en realidad una función de estado y por lo tanto da cuenta de la evolución termodinámica de la pluma de soluto.

Para desarrollar una metodología específica a partir de estas ideas nuevas interesa en primer lugar despejar el Coeficiente $E$. Se puede demostrar que la relación que existe entre $\tau$ como tiempo característico y t como tiempo general (variable independiente) está determinada por la distribución de Poisson aplicada al movimiento totalmente aleatorio (estadístico) de las partículas del trazador. (Constain *et al*, 2011) Esta relación numérica es:

$$\frac{\tau}{t} = \beta \approx 0.215 \tag{15}$$

Por lo tanto despejando $E$ en la ecuación (14) queda:

$$E = \frac{\phi^2 U_x^2 \beta t}{2} \tag{16}$$

Esta nueva metodología será denominada INIRIDA DEEP FLOW (*IDF*) por cuanto así se llama el equipo que materializa su aplicación práctica.

### 3.2. REDEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN DE FICK Y CÁLCULO DEL CAUDAL

Si se parte de la ecuación (16) y se reemplaza en la ecuación clásica de Fick (2) se llega a una nueva relación para la concentración del soluto en función del tiempo. Aquí el sumando $Co$ es la concentración salina de fondo del cauce considerado. El caudal $Q$ aparece por cuanto en la expresión final del denominador aparece el producto área por velocidad ($U * A$).

$$C(t) = \frac{M}{Q \times \phi \times t \times \sqrt{2\pi\beta}} e^{-\frac{(X-U\,t)^2}{2\beta\phi^2 U^2 t^2}} + Co \tag{17}$$

### 3.3. FUNCIÓN Φ

La función $\Phi$ que aparece en la ecuación (14) es de gran importancia en este modelo alterno, ya que representa la evolución de la pluma de trazador en sus principales aspectos, y por lo tanto puede ser usada aproximadamente para calcular los parámetros *ADZ* desde la perspectiva del nuevo método. La función $\Phi(t)$ define la asimetría de la curva de trazador como se ha establecido antes. Su naturaleza es termodinámica y por lo tanto tiene un comportamiento ascendente y luego descendente implicando una dinámica cerrada en la curva $C$ (función de estado). Se utiliza solamente el flanco descendente de la curva. En la Figura 4 se muestran valores probables de sus topes notables en la parte superior e inferior de la función y el punto (línea roja) para el cual la sustancia trazadora llena uniformemente la sección transversal del cauce en condición de Mezcla completa (a la "Longitud de mezcla").

$$\oint_C d\phi = 0 \tag{18}$$

### 3.4. CÁLCULO PRÁCTICO DE $\phi$

En la práctica $\phi$ se mide en la curva de soluto en examen, conociendo la distancia desde el punto de inyección súbita y el

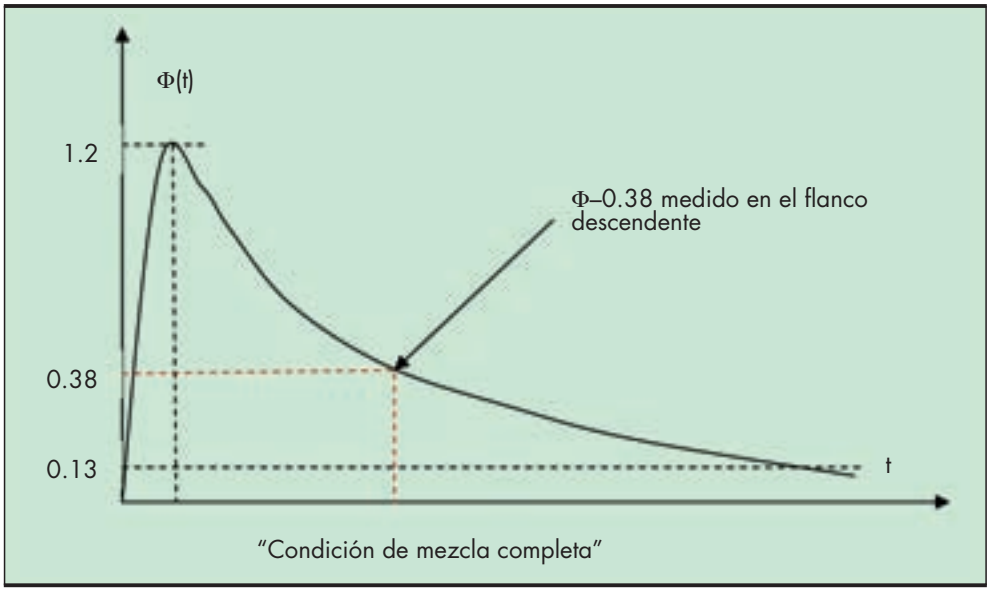



**FIGURA 4.** Curva típica de la función $\Phi$.

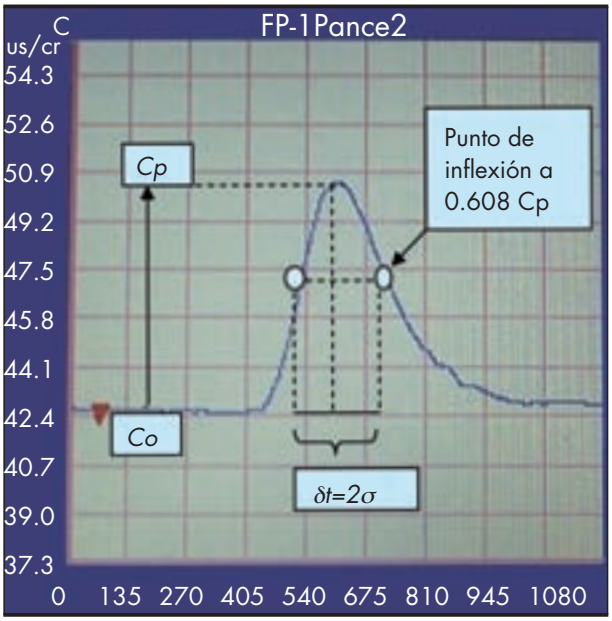



**FIGURA 5.** Medición práctica de $\Phi$ a partir de los datos de la curva de trazador.

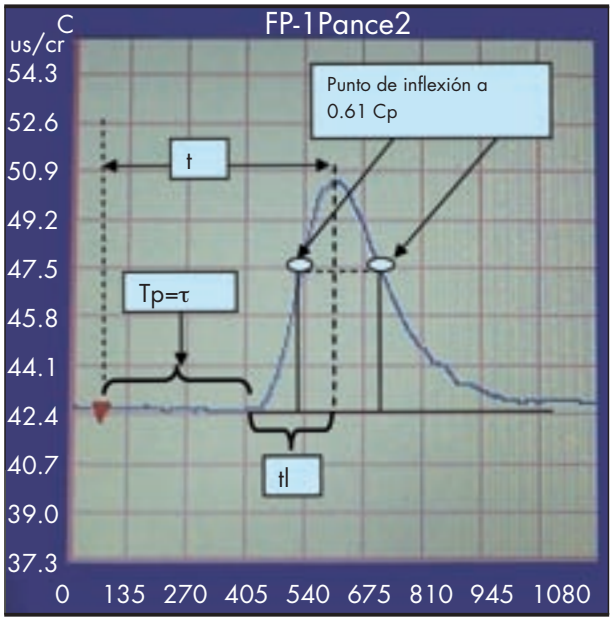



**FIGURA 6.** Cálculo de los tiempos extremos de una curva de soluto.

punto de medición fijo en la orilla y estableciendo el tiempo transcurrido entre estos dos eventos. En la Figura 4 se muestra una pantalla de un instrumento de software útil para medición y análisis de cauces con el tiempo como abscisa (*t=segundos*). En esta pantalla se muestra el instante de inyección súbita de una masa determinada de trazador mediante una pequeña flecha roja. La curva de trazador (sal común en el caso mostrado) se sobrepone en una concentración de fondo *Co*, correspondiente a la concentración iónica de los aportes diversos del lecho y la escorrentía. Figura 5.

En Figura 5 se hacen los cálculos para la función $\Phi$. De la teoría Gaussiana básica y de la definición temporal para $E$ se tiene que:

$$y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \tag{19}$$

$$\delta t = 2\sigma = 2\sqrt{\beta}\,\phi\,t \tag{20}$$

Por lo tanto $\Phi$ se calcula a partir de la siguiente fórmula con todos los datos conocidos, ya que $\delta t$ y $t$ se miden en la curva y $\beta \approx 0.215$ (Constain *et al*, 2012):

$$\phi = \frac{\delta t}{2\,t\,\sqrt{\beta}} \tag{21}$$

### 3.5. CÁLCULO DEL TIEMPO DE LLEGADA DE LAS PARTÍCULAS DE TRAZADOR, CORRESPONDIENTE A $\tau$ (*ADZ*)

Una definición importante que se obtiene del análisis de la ecuación modificada de Fick es la correspondiente a la desviación estándar que se obtiene de la interpretación Gaussiana de las expresiones correspondientes. Este análisis permite además tener otra forma alterna de calcular a $\Phi$, y por lo tanto comparar con el primer método delineado anteriormente.

La desviación estándar, $\sigma$, sirve para determinar los puntos "extremos" de la curva real de trazador, en especial el punto más "avanzado" correspondiente a la llegada de las primeras partículas del soluto. Se sabe de la estadística matemática que un 95% del área de la curva Gaussiana se cubre aproximadamente con dos desviaciones a partir de centro de la curva. Esta indicación sirve para calcular en avance el tiempo en el cual aparecerán las primeras partículas de trazador. Entonces si se llama a "*t1*" como el tiempo contado desde el centro de la curva en que aparecen las primeras partículas de soluto dispersándose, se tendrá como en la Figura 6.

Se tiene entonces:

$$t_1 \approx 2 \times \sqrt{\beta}\,\phi\,t \tag{22}$$

$$T_{primeras\ particulas} = T_p \approx t - t_1 = t(1 - 2 \times \sqrt{\beta}\,\phi) \tag{23}$$

Dentro de definiciones de la metodología *ADZ* se tiene:

$$\tau \approx T_p = t(1 - 2 \times \sqrt{\beta}\,\phi) \tag{24}$$

Dado que esta fórmula involucra la naturaleza dinámica del movimiento del frente de distribución (involucrada en $\Phi(t)$), no es necesario utilizar dos curvas secuenciales.

### 3.7. CÁLCULO DEL TIEMPO DEL CENTROIDE, ts (*ADZ*)

Tal como se explica en un artículo anterior del autor (Constain, 2012) la función $\Phi$ al medir la asimetría de la curva también es sensible a la disponibilidad de la masa del trazador (comparación entre masa ideal y masa efectiva), por lo tanto, en principio, se puede igualar a varias otras razones dentro de la dinámica de la dispersión en flujos turbulentos, entre ellas la razón del tiempo del centroide al tiempo del centro de masa (concentración pico), *rq*:

$$\phi = f\left(\frac{V_{disp}}{U}, \frac{M_{ideal}}{M_{efectiva}}, \ldots\ldots \frac{1}{2\sqrt{\beta}}\frac{\delta t}{t}, \frac{t_s}{t_0}\right) \tag{25}$$

Esta curva matemática seria una recta con una pendiente a 45° con inicio en el origen. Figura 7.

Sin embargo el valor limite del tiempo del centroide es el tiempo del centro de masa (concentración pico), por lo tanto el valor límite inferior es *rq=1*. Esta condición se obtiene para valores cercanos a $\Phi \approx 0.38\text{-}0.5$, por lo tanto, la grafica anterior toma la siguiente forma esquemática. Figura 8.

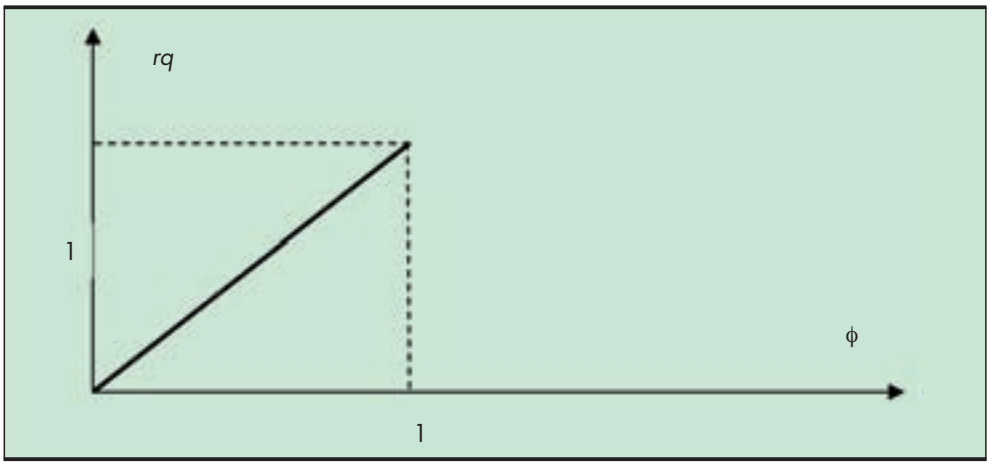



**FIGURA 7.** Recta básica para *r* en función de *Φ*.

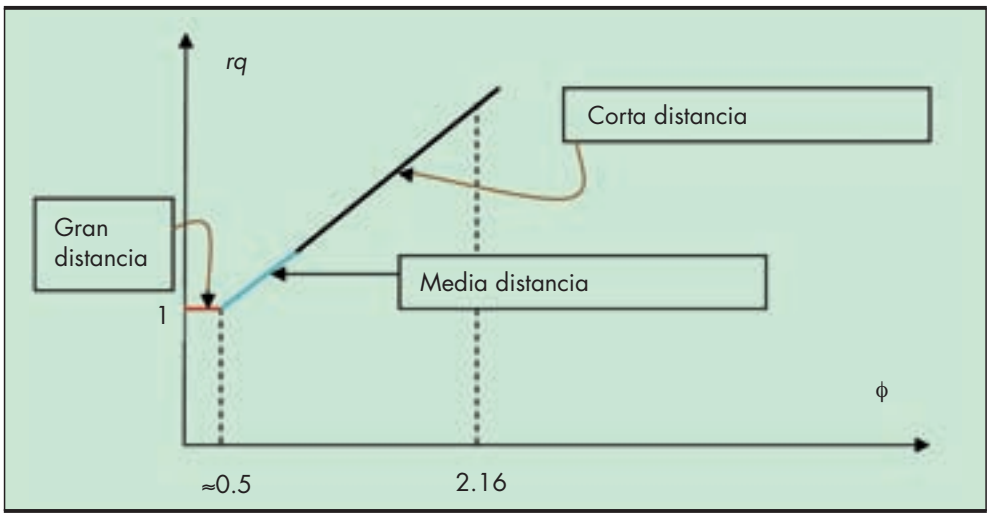



**FIGURA 8.** Ajuste para la recta que relaciona a *r* en función de *Φ*.

Se puede demostrar que para *rq=4 Φ vale 2.16* mientras que para *rq=2 Φ vale 1.08*. Para *Φ<0.38 rq* tiende a 1. Por lo tanto se puede plantear:

$$r_q(\phi) = \frac{t_s}{t_0} \approx 1.0 \qquad Si\ \Phi < 0.38 \tag{26}$$

$$r_q(\phi) = \frac{t_s}{t_0} \approx \phi + 1.0 \qquad Si\ \Phi > 1.1 \tag{26 bis}$$

Una aproximación aceptable para esta función en todo el dominio de *Φ* es:

$$r_q(\phi) = \frac{t_s}{t_0} \approx 0,9\ \phi^{1,55} + 1.0 \tag{27}$$

En la Figura 9 se muestra esta relación aproximada entre *rq* y *Φ* teniendo en cuenta los criterios de ajuste anteriores.

A partir de estas apreciaciones se puede definir tres regiones notables en la curva:

1. Región cercana (línea roja) para valores bajos de *Φ* (hasta *Φ≈ 0.38*) en los que el centroide y el centro de masa estarán muy cercanos, *rq=1*. Esta situación es para sitios de medición de la curva de trazador alejados del vertimiento en los que las curvas tienen ya una marcada simetría Fickiana.
2. Región mediana (línea azul) en la que *Φ* tiene valores medio (desde *Φ≈ 0.38* hasta *Φ≈ 0.50*). En esta región la asimetría No- Fickiana es mayor y corresponde a sitios de medición intermedios.
3. Región lejana (línea negra) en la que *Φ* tiene valores altos (*Φ> 1.1*) y los sitios de medición son muy cercanos al punto de vertimiento y las curvas de trazador son muy asimétricas. En estos tres casos *rq disminuye* con la distancia.

Por lo tanto, se puede entonces calcular aproximadamente el tiempo del centroide en función del tiempo de la concentración pico:

$$t_s \approx r_q(\phi)\, t_0 \tag{28}$$

Este es el segundo parámetro de interés en la metodología *ADZ*. El tiempo de residencia del trazador es, en función de *Φ*, como sigue, calculado para las dos curvas secuenciales:

$$Tr = \Delta t_s(\phi) - \Delta\tau(\phi) \tag{29}$$

El valor entre el paréntesis es pequeño pero crece al pasar el tiempo, lo que implica que el tiempo de residencia *ADZ* crece paulatinamente en tanto avanza la pluma.

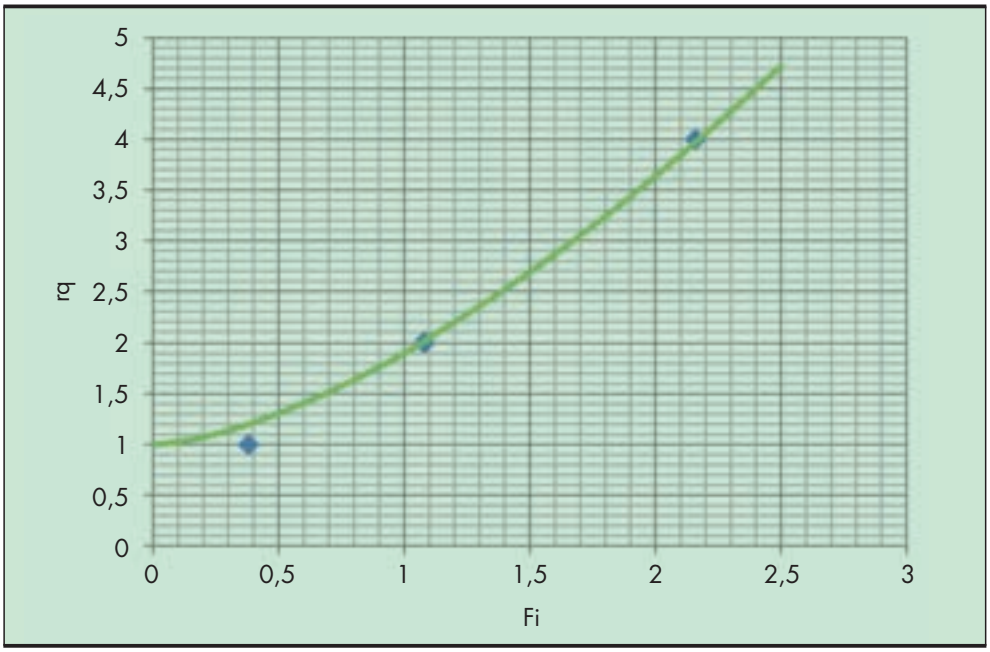



**FIGURA 9.** Curva aproximada para la relación entre rq y $\Phi$.

La fracción dispersiva (otro parámetro de interés en la teoría *ADZ*) calculado para las dos curvas secuenciales es entonces:

$$DF = \frac{T_r(\phi)}{\Delta t_s(\phi)} \qquad (30)$$

La ventaja de estas definiciones sobre las versiones originales de la teoría *ADZ* es que al disponerse de una función cuya definición en función del tiempo puede conocerse, permite predecir en avance las características de estos parámetros y no solo medirlos para un caso específico.

## 4. APLICACIONES PRÁCTICAS DE LAS FÓRMULAS PARA PARÁMETROS *ADZ* EN FUNCIÓN DE $\Phi$

En seguida se presentan aplicaciones de los cálculos de los parámetros *ADZ* en función de los parámetros *IDF*, en especial la función de asimetría, $\Phi$. Se comienza con una aplicación de bajos valores de $\Phi$ en el que $rq \approx 1$ (Canal Caltech, USA). Luego se pasa a un caso en el que $\Phi$ tiene valores intermedios (río Guavio, Colombia) y un $rq > 1$. Por último se estudia un caso en el que $\Phi$ tiene valores más altos y $rq$ crece más aún.

### 4.1. CANAL CALTECH

Este experimento permite verificar las fórmulas para el "Rango cercano" para la fórmula $r(\Phi)$. Este experimento fue realizado por H.B. Fischer en el canal calibrado de 40 metros con pendiente ajustable y recirculación, del W.M Keck Laboratory de Caltech en 1966 (Fischer, 1966), con el fin de verificar la fórmula de Elder para la dispersión en canales. Este es un canal rectangular de paredes de plástico y lecho de acero inoxidable. Tiene un recorrido uniforme desde *0.0 m* hasta los *38.6 m*. Para el experimento en cuestión se utilizo una pendiente de 0.0002 ajustada mediante los aparejos mecánicos de precisión del laboratorio. El experimento denominado por su autor como "Series" 2700 consistió en ocho vertimientos ("Run") con sal común. Cuatro (2700 a 2704) hechos a *X1= 14.06 m* y otros cuatro (*2705-2708*) hechos a *X2= 25.06 m*. Figura 10.

La Tabla 1 muestra los datos básicos del trazador salino aplicado al experimento (Método *IDF*). Mientras que las dos

**FIGURA 10.** Aspecto del montaje medición de trazadores en el canal Caltech, USA.

| Sitio | $\Phi$ | Cp (Mgr/l) | to (s | U (m/s) |
|---|---|---|---|---|
| X1=14.06 m | 0.137 | 135.0 | 37.8 | 0.372 |
| X2=25.06 m | 0.130 | 78.8 | 67.4 | 0.372 |

**TABLA 1.** Datos del trazador salino en el canal Caltech (metodología *IDF*).

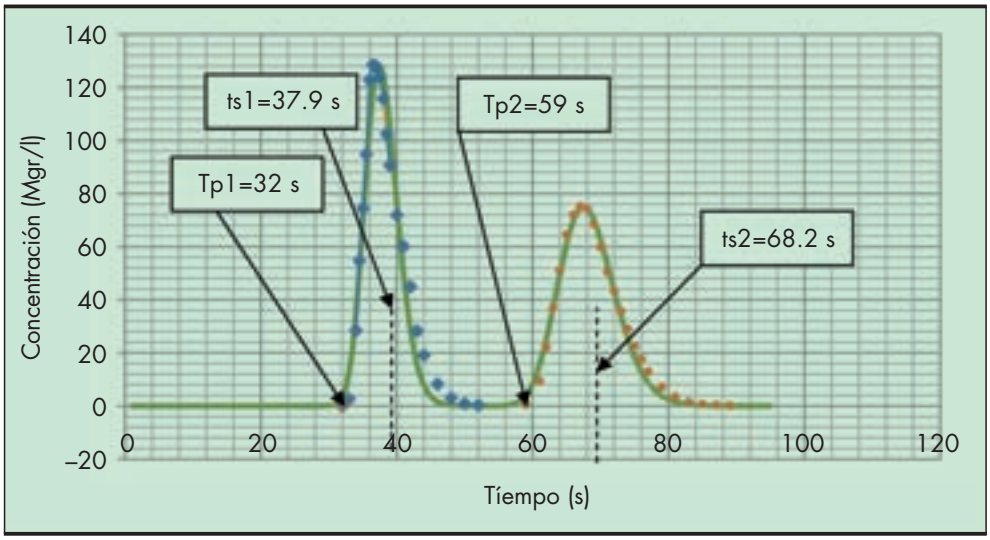



**FIGURA 11.** Curvas secuenciales en el canal Caltech para análisis *ADZ*.

curvas secuenciales se muestran en la Figura 11 con los valores experimentales notables que luego se comparan con los valores calculados.

Para la estimación experimental del tiempo del centroide, *ts* se utiliza la fórmula estadística usual (calculado mediante EXCEL):

$$t_s \approx \frac{\sum_i A_i \times t_i}{\sum_i A_i} = \frac{\sum_i (c_i \Delta t_i) \times t_i}{\sum_i (c_i \Delta t_i)} \qquad (31)$$

La Tabla 2 muestra los datos experimentales individuales y en secuencia que se obtienen para el análisis de los parámetros *ADZ* de estas curvas.

Verificación de estos valores experimentales mediante el cálculo con fórmulas *IDF* (ecuaciones 24, 27 y 28):

### *4.1.1. Cálculo de los datos individuales*

Se aplican las ecuaciones (24) y (28):

X1= 14.06 m

$$\tau_1 = T_{P-1} \approx t_{01}(1 - 2\sqrt{\beta}\,\phi_1) = 37.6\,(1 - 2 \times 0.464 \times 0.137) = 32.8\ s$$

$$t_{s1} \approx 1.04\, t_{01} = 1.04 \times 37.6 = 39.1s \quad r_q = 1.04\ para\ \Phi = 0.137$$

X2=25.06 m

$$\tau_2 = T_{P-2} \approx t_{02}(1 - 2\sqrt{\beta}\,\phi_2) = 67.7(1 - 2 \times 0.464 \times 0.130) = 59.5\ s$$

$$t_{s2} \approx 1.03\, t_{02} = 1.03 \times 67.7 = 69.7s \quad r_q = 1.03\ para\ \Phi = 0.130$$

### *4.1.2. Datos de las 2 curvas secuenciales*

#### *A.- Tiempo de residencia, Tr:*

De acuerdo con la Tabla 3 y aplicando las ecuaciones (29) y (30) se tiene:

$$\Delta t_s = 67.7s – 37.6s = 30.1s$$

$$\Delta\tau = 59.5s – 32.8s = 26.7s$$

Por lo tanto:

$$T_r = 30.1 – 26.7 = 3.4s$$

#### *B.- Fracción dispersiva, DF:*

$$DF = \frac{T_r}{\Delta t_s} = \frac{3.4}{30.1} = 0.113$$

Los datos experimentales y los calculados teóricamente para esta jornada de campo se muestran en la Tabla 3.

## 4.2. RÍO SEVERN

Este experimento permite verificar las fórmulas para el "Rango mediano" para la fórmula *rq(Φ)* ya que 0.26<Φ<0.41. Este estudio de la dispersión usando trazadores conservativos fue realizado en el río Severn (Gales) por T.C. Atkinson, P.M. Davies y T.M. L. Wingley del Reino Unido (Davis *et al*, 2000). Para lograr esto las mediciones de trazador se hacen en un largo tramo de 14 kilómetros (entre Llanidloes y Caersws) utilizando seis puntos de aforo (estaciones de la *A* a la *G*) puestos uno detrás de otro en esta distancia. El trazador utilizado es Rodamina WT al 20%. Figura 12.

| Sitio | τ (s) | ΣAi = Σ(ciΔti) | ΣAiti = Σ(ciΔti)ti | ts= ΣAiti/ΣAi (s) | Tr=Δts-Δτ (s) | DF=Tr/Δts |
|---|---|---|---|---|---|---|
| X1=14.06 m | 32.0 | 767.0 | 12803383 | 37.9 | 3.3 | 0.11 |
| X2=25.06 m | 59.0 | 767.0 | 5230.8 | 68.2 | | |
| Δts=ts2-ts1 (s) | – | – | – | 30.3 | | |
| Δτ=τ2-τ1 (s) | 27 | – | – | – | | |

**TABLA 2.** Datos experimentales individuales y en secuencia *ADZ* del canal Caltech.

| Sitio | Tp Medido (s) | Tp≈τ Calculado (s) | ts Medido (s) | ts Calculado (s) | Tr Medido (s) | Tr Calculado (s) | DF Medido | DF Calculado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X1=14.06 m | 32.0 | 32.8 | 37.9 | 37.6 | 3.3 | 3.4 | 0.109 | 0.113 |
| Error porcentual | 2.5% | | 3% | | | | | |
| X2=25.06 m | 59.0 | 59.5 | 68.2 | 69.7 | | | | |
| Error porcentual | 1.0% | | 2% | | 3% | | 3.7% | |

**TABLA 3.** Comparación de datos individuales con las dos metodologías, *ADZ* e *IDF*.

**FIGURA 12.** Aspectos del río Severn (Gales) cerca de Caersws.

Para lograr un recorrido más largo (Y por lo tanto más discriminación) se utilizan las curvas de las estaciones *A* y *C*. Figura 13. Se muestran los datos correspondientes a estas curvas para los parámetros *ADZ*. Tabla 6.

La Tabla 4 muestra los datos básicos *IDF* del trazador fluorescente (RWT) aplicado al experimento.

Repitiendo el proceso que se hizo para el canal Caltech, se aplica ahora al río Severn. El Cuadro 5 muestra los datos experimentales individuales y en secuencia que se obtienen para el análisis de los parámetros experimentales *ADZ* para estas curvas.

| Sitio | Φ | Cp (Ppb) | to (s) | U (m/s) |
|---|---|---|---|---|
| XA=210 m | 0.41 | 1075 | 300 | 0.70 |
| XC=2875 m | 0.26 | 114.2 | 4129 | 0.70 |

**TABLA 4.** Datos del trazador salino para el río Severn (metodología *IDF*).

Verificación de estos valores experimentales mediante el cálculo con fórmulas *IDF*, repitiendo las consideraciones hechas en el cauce anterior.

### *4.2.1. Cálculo de los datos individuales:*

XA= 210 m

$$\tau_1 = T_{P-1} \approx t_{01}(1 - 2\sqrt{\beta}\,\phi_1) = 300\,(1 - 2\times 0.464\times 0.41) = 185.9\ s$$

$$t_{s1} \approx 1.20\,t_{01} = 1.20\times 300 = 360\ s \quad r_q = 1.2\ para\ \Phi = 0.41$$

XC=2875 m

$$\tau_2 = T_{P-2} \approx t_{02}(1 - 2\sqrt{\beta}\,\phi_2) = 4129(1 - 2\times 0.464\times 0.26) = 3132.8 s$$

$$t_{s2} \approx 1.1\,t_{02} = 1.1\times 4129 = 4542\ s \quad r_q = 1.1 para\ \ \Phi = 0.26$$

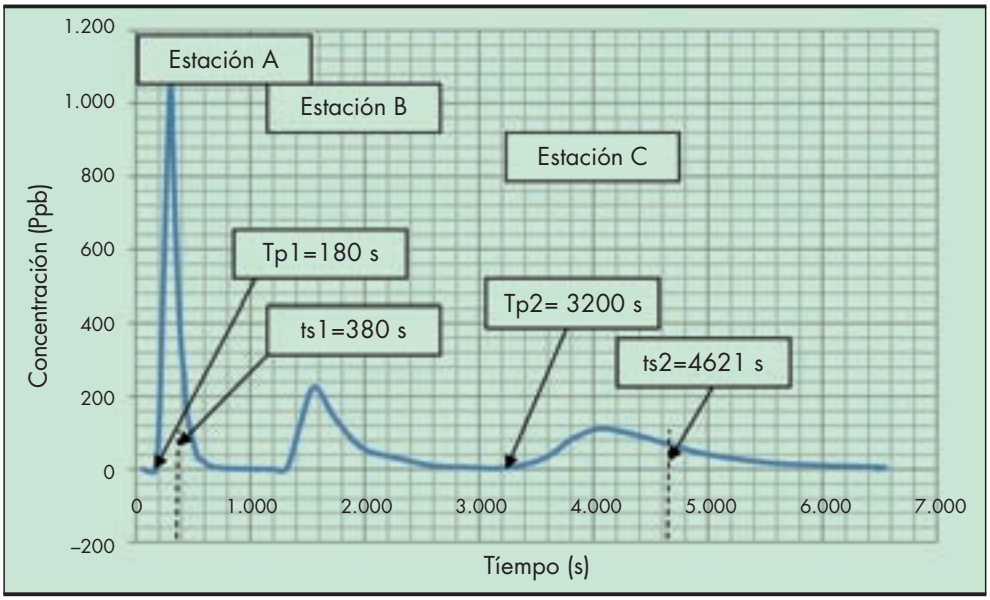



**FIGURA 13.** Curvas de tres estaciones a lo largo del trecho en el río Severn.

**TABLA 5.** Datos experimentales individuales y en secuencia *ADZ* del río Severn.

| Sitio | τ=Tp (s) | Σ*Ai* = Σ(ci*Δti*) | Σ*Aiti* = Σ(ci*Δti*)*ti* | ts= Σ*Aiti*/Σ*Ai* (s) | Tr=Δts-Δτ (s) | DF=Tr/Δts |
|---|---|---|---|---|---|---|
| X1=210 m | 180.0 | 165331 | 62854456 | 380.2 | 1220.3 | 0.29 |
| XC=2875 m | 3200.0 | 132138 | 610544160 | 4620.5 | | |
| Δts=ts2-ts1 (s) | – | – | – | 4240.3 | | |
| Δτ=τ2-τ1 (s) | 3020 | – | – | – | | |

| Sitio | τ Medido (s) | τ≈Tp Calculado (s) | ts Medido | ts Calculado (s) | Tr Medido (s) | Tr Calculado (s) | DF Medido | DF Calculado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X1=210 m | 180.0 | 185.9 | 380.2 | 360 | 1220.3 | 1238.2 | 0.29 | 0.30 |
| Error porcentual | 3.3% | | 5% | | | | | |
| X2=2875 m | 3200.0 | 3132.8 | 4620.5 | 4542 | | | | |
| Error porcentual | 2.2% | | 2% | | 2% | | 3.4 % | |

**TABLA 6.** Comparación de datos individuales con las dos metodologías, *ADZ* e *IDF*.

### *4.2.2. Datos calculados de las 2 curvas individuales*

***A.- Tiempo de residencia, Tr:***

De acuerdo con los cálculos anteriores se tiene:

$$\Delta t_s = 4542s - 360s = 4182s$$

$$\Delta\tau = 3132.8s - 189s = 2943.8s$$

Por lo tanto:

$$T_r = 4182 - 2943.8 = 1238.2s$$

***B.- Fracción dispersiva, DF:***

$$DF = \frac{T_r}{\Delta t_s} = \frac{1238.2}{4182} = 0.30$$

Los datos experimentales y los calculados teóricamente para esta jornada de campo se muestran en la Tabla 6.

**FIGURA 14.** Aspecto del río Guavio en Colombia.

## 4.3. RÍO GUAVIO

La siguiente experimentación fue realizada en el año 2000 en el río Guavio cercano a Bogotá, Colombia por el grupo de investigación de la Universidad de los Andes. Figura 14. Los datos de las jornadas están compilados en sendos informes de trabajos de postgrado. Este experimento permite verificar las fórmulas para el "Rango lejano" para la fórmula *r(Φ)* teniendo en cuenta que la curva de trazador se toma muy cercana al vertimiento. (Holguín, 2002).

Las dos curvas secuenciales se muestran en las Figuras 15 y 16 mientras que la Tabla 7 muestra los datos básicos *IDF* del trazador salino aplicado al experimento.

Los datos experimentales (medidos) *ADZ* para río Guavio son obtenidos de un examen detallado de las dos curvas y mediante la aplicación de las fórmulas pertinentes en EXCEL. Tabla 8.

### *4.3.1. Datos individuales (calculados)*

XA= 57 m

$$\tau_1 = T_{P-1} \approx t_{01}(1 - 2\sqrt{\beta}\,\phi_1) = 420\,(1 - 2\times 0.464\times 0.60) \approx 186.1\,s$$

$$t_{s1} \approx 1.40\,t_{01} = 1.40\times 420 = 588\,s \quad r_q = 1.4\ para\ \Phi = 0.60$$

XC=240 m

$$\tau_2 = T_{P-2} \approx t_{02}(1 - 2\sqrt{\beta}\,\phi_2) = 1740(1 - 2\times 0.464\times 0.47) \approx 981s$$

$$t_{s2} \approx 1.25 t_{02} = 1.25\times 1740 \approx 2175\,s \quad r_q = 1.25\ para\ \Phi = 0.47$$

| Sitio | Φ | Cp (Ppb) | to (s) | U (m/s) |
|---|---|---|---|---|
| X1=57 m | 0.60 | 74.2 | 420 | 0.136 |
| X2=240 m | 0.47 | 37.4 | 1740 | 0.140 |

**TABLA 7.** Datos del trazador salino para el río Guavio (metodología *IDF*).

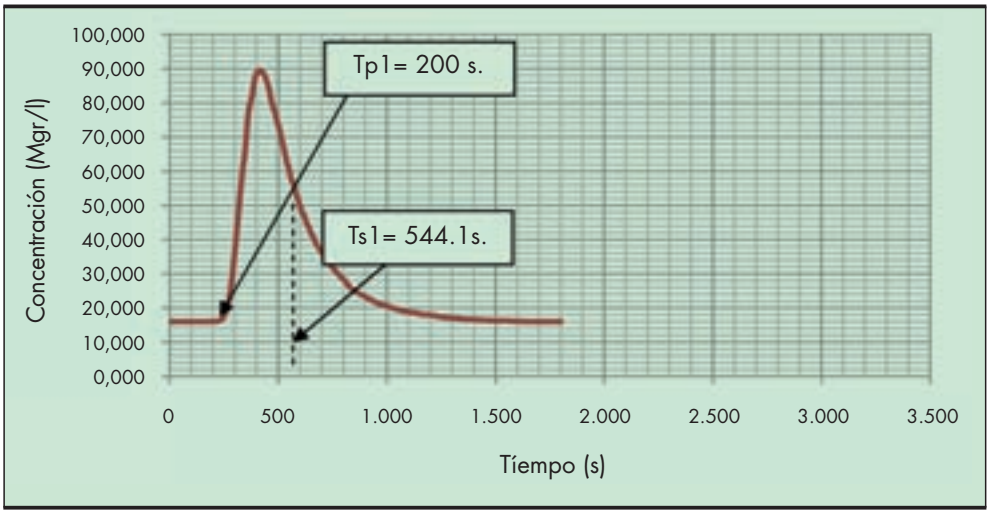



**FIGURA 15.** Primera curva sobre el mismo vertimiento en el río Guavio.

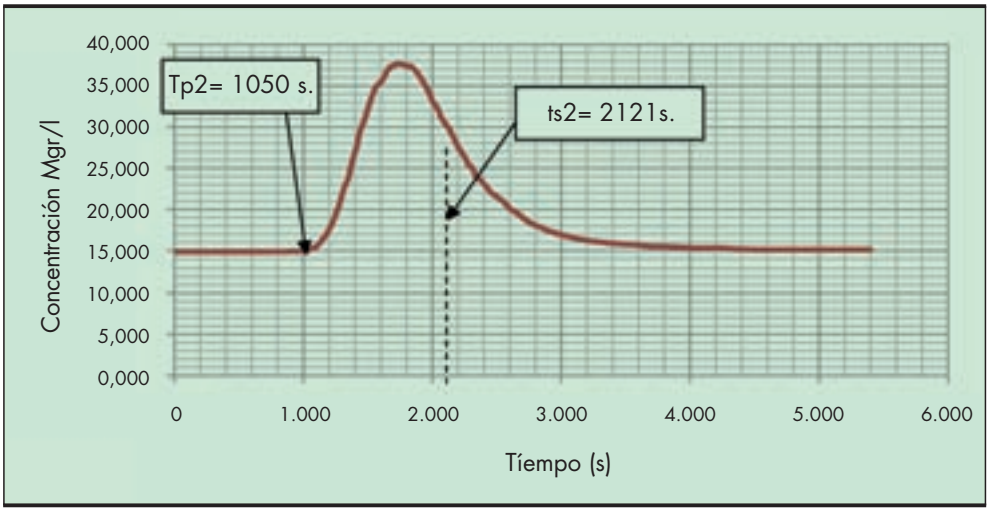



**FIGURA 16.** Segunda a curva sobre el mismo vertimiento en el río Guavio.

### *4.3.2. Datos en conjunto calculados de las 2 curvas individuales*

#### *A.- Tiempo de residencia, Tr:*

De acuerdo con los cálculos anteriores se tiene:

$$\Delta t_s = 2175s – 588s = 1587s$$

$$\Delta\tau = 981s – 186.1s = 794.9s$$

Por lo tanto:

$$T_r = 1587 – 794.9 = 792.1s$$

#### *B.- Fracción dispersiva, DF:*

$$DF = \frac{T_r}{\Delta t_s} = \frac{792.1}{1587} = 0.50$$

Los datos experimentales y los calculados teóricamente para esta jornada de campo se muestran en la Tabla 9.

| Sitio | τ=Tp (s) | ΣAi = Σ(ciΔti) | ΣAiti = Σ(ciΔti)ti | ts= ΣAiti/ΣAi (s) | Tr=Δts-Δτ (s) | DF=Tr/Δts |
|---|---|---|---|---|---|---|
| X1=57 | 200 | 23532.0 | 12803383 | 541 | 730 | 0.46 |
| X2=240 | 1050 | 22906.4 | 46315099 | 2121 | | |
| Δts=ts2-ts1 (s) | – | – | – | 1580 | | |
| Δτ=τ2-τ1 (s) | 850 | – | – | – | | |

**TABLA 8.** Datos experimentales *ADZ* para río Guavio.

| Sitio | τ Medido (s) | τ≈Tp Calculado | ts Medido (s) | ts Calculado (s) | Tr Medido (s) | Tr Calculado (s) | DF Medido | DF Calculado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X1=57 m | 200 | 186.1 | 541 | 588 | 730 | 792.1 | 0.46 | 0.50 |
| Error porcentual | 7% | | 9% | | | | | |
| X2=240 m | 1050 | 981 | 2121 | 2175 | | | | |
| Error porcentual | 7% | | 3% | | 9% | | 9% | |

**TABLA 9.** Datos experimentales y teóricos para río Guavio.

## 5. CONCLUSIONES

1. Se desarrollan fórmulas que basadas en la metodología *IDF* se aplican a traducir los parámetros *ADZ* en función de aquellos. Los resultados teóricos se acercan a los experimentales dentro de un rango de precisión entre 2%-9% en promedio, suficiente para el trabajo de campo en el tema de hidráulica ambiental.
2. La nueva metodología se basa fundamentalmente en la definición e interpretación de una función temporal $\Phi(t)$ que guía los diferentes fenómenos en la evolución de las plumas de trazador en los cauces naturales.
3. Estas nuevas fórmulas cubren tres diferentes casos: Medición lejana de la pluma de trazador cuando la función $\Phi(t)$ tiene valores bajos $(<0.38)$; Medición intermedia cuando dicha función tiene valores medios$(0,38 <\Phi<1,1)$ y Medición cercana cuando $\Phi>1.1$.
4. Esta traducción es muy interesante pues permite tender un puente entre las metodologías de "zonas muertas" y las que no parten de este concepto. Aunque el concepto de "centroide" de distribución que se usa como información clave en el Método *ADZ* es una descripción "local" (valida solo para un observador fijo en la orilla del flujo) no puede ignorarse que es una metodología ampliamente utilizada hoy día.
5. La facilidad de aplicación del nuevo método permite agilizar y ampliar los estudios de Calidad de aguas, basados en trazadores para su calibración y validación.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Edgard Holguín, investigador de la Universidad de los Andes por el suministro de información detallada sobre mediciones de trazador en el río Guavio.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Beer T., & Young P.C. (1983). *Longitudinal dispersion in natural streams. Journal og environmental Engineering.* 109, Pp 1049-1067.

Davis P.M., Atkinson T.C. & Wigley T.M. L.(2000). *Longitudinal dispersion in natural channels: 2. The role of shear flow dispersion and dead zones in the River Severn, UK.* Hydrology and Easrth systems Sciences, 4(3), 355-371.

Constain A.J y Lemos R. (2011). *Una ecuación de la 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 aguas.* Revista Ingeniería Civil No. 164, Madrid, CEDEX, Pp114- 135.

Constain A.J. (2012) *Definición y análisis de una función de evolución de solutos dispersivos en flujos naturales.* Revista DYNA. No. 79. Medellín, Pp 173-181.

Fischer H.B. (1966). *Longitudinal dispersion in laboratory and natural channels*. Caltech PhD thesis.

Holguín J. *Tesis de postgrado sobre trazadores,* Universidad de los Andes, Bogotá, 2002.

Jobson H.E. (1996) *Prediction of travel time and longitudinal dispersion in rivers and streams*. USGS Report in internet.

Runkel R.L (1998) *Transporte Unidimensional con flujo lateral y almacenamiento: un modelo de transporte de solutos para arroyos y ríos*. Report 98-4018. USGS.

# Alta Velocidad Ferroviaria en California (USA): Quinta Parte (V) LAV San Francisco–Sacramento (Bay Crossing Alternative)

# *High Speed Railway in California (USA): Fith Part (V) HSRL San Francisco–Sacramento (Bay Crossing Alternative)*

**MANUEL DÍAZ DEL RIO JÁUDENES (*), LUIS FORT LÓPEZ–TELLO (**) y CARMEN FORT SANTA–MARÍA (***)**

**RESUMEN** Este artículo de la serie "Alta velocidad Ferroviaria en California (CHSRS), se ocupa de la línea San Francisco–Sacramento "Bay Crossing Alternative", que cierra la red de alta velocidad ferroviaria del Estado de California, permitiendo en la terminal HSR de Sacramento, conectar con la línea Fresno–Sacramento, en coincidencia de trazados para en el futuro prolongar la red californiana de alta velocidad ferroviaria hasta su entronque con la del Estado de Nevada, vía Tahoe Lake–Reno. La línea San Francisco–Sacramento "Bay Crossing Alternative", consta de tres trayectos: El primero de ellos "San Francisco urbano" va desde la terminal HSR "San Francisco Airport", donde termina la alternativa "Golden Gate" de la línea Fresno–San Francisco, hasta el viaducto de acceso al Paso de la Bahía, que constituye el segundo trayecto "San Francisco–Richmond", trayecto estrella de la red, de 15,48 Km de longitud sobre la Bahía de San Francisco, con desarrollo a través de 11,28 Km en puente colgante múltiple, con vanos de 800 m de luz y 67 m de altura libre bajo el tablero que permite la navegación en la Bahía. El tercer trayecto "Richmond–Sacramento" cruza la Bahía de San Pablo con un puente colgante de 1,6 Km de longitud y tipología similar a los múltiples de la Bahía de San Francisco, pasa por Vallejo (la por plazo breve de tiempo, antigua capital del Estado de California) y por la universitaria Davis, antes de finalmente llegar a la HSR Terminal Station de Sacramento Roseville.

**ABSTRACT** *This article of the series "California High Speed Railway System"(CHSRS) treats on Line San Francisco–Sacramento "Bay Crossing Alternative" (BCA). This line closes the system of California high speed state railway, and connects with the line Fresno–Sacramento "Stockton Arch Alternative", joining its alignments in the HSR Terminal of Sacramento Roseville. From this station it will be possible, in the future, to extend the Californian railway system till the Nevada railway system, vía Tahoe Lake and Reno. The BCA consists of three sections: The first one passing through San Francisco city, goes from HSR San Francisco Airport Terminal Station (where the line Fresno–San Francisco "Golden Gate Alternative" ends), up to the Viaduct access at the Bay Crossing. The second section San Francisco–Richmond, constitutes the star section of the system, with 15,48 Km length on the San Francisco Bay, where 11,28 Km in multi suspension bridge , 800 m span and 67 m gauge under panel, to allow navigation through the Bay. The third section Richmond–Sacramento crosses the San Pablo Bay through another suspension bridge of similar typology to that of San Francisco Bay crossing; pass through Vallejo (the ancient and for a short time Head of the State of California) and through Davis, university city, to arrive to the HSR Terminal Station of Sacramento Roseville.*

(*) Dr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ex Director de Infraestructuras, de Planificación, y de Operaciones Internacionales de Renfe. Ex Presidente de la Commission "Tunnels", Union Internationale des Chemins de Fer (UIC). París. Catedrático Jubilado de la UPM. Professor "at large" Berkeley Univ. (Institute for Transportation Studies). California. Jury au Doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse). E–mail: mdrio@telefonica.net

(**) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dr. Ingeniero Agrónomo. Ministerio de Fomento. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Laboratorio de Geotecnia. Profesor Titular excedente de la UPM. E–mail: lfort@ciccp.es

(***) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. DEA en Ingeniería del Terreno. Eptisa, S.I. División de Infraestructura del Transporte. Madrid. E–mail: cfort@eptisa.com

***Palabras clave:*** Alta Velocidad, California, Puentes colgantes, Seguridad ferroviaria, Bahía de San Francisco, Energía hidrocinética.

***Keywords:*** High Speed, California, Suspension bridges, Railway safety, San Francisco bay, Hydrokinetic energy.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Proyecto FARWEST plantea como hito final para culminar la red de alta velocidad ferroviaria del Estado de California (CHSRS), según la previsión del Plan federal de alta velocidad ferroviaria de Estados Unidos (USHSRS) (Figura 0),la construcción de la LAV San Francisco Airport–Sacramento Roseville, cruzando la Bahía de San Francisco ("Bay Crossing Alternative").

Esta línea, no prevista en la planificación de la red por la Authority, se considera en el planteamiento del proyecto FARWEST de necesaria realización para el óptimo y completo funcionamiento de la red de alta velocidad ferroviaria de California, comunicando con la capital Sacramento y entre sí todas las grandes ciudades (San Francisco, Fresno, Los Angeles y San Diego) y áreas urbanas del Estado (Bay Area, Great Valley, Southern California), y dejando preparadas las conexiones a gran velocidad previstas en el USHSRS, con la del estado adyacente de Nevada (NHSRS): Las Vegas, por "Dessert Express" y Reno, vía "Tahoe Lake" (Figura 1).

El coste unitario de esta línea es el más elevado de toda la red 66,58 M$/Mile (Tabla 1), por lo que, dada la situación de la economía mundial, debe programarse para etapas más avanzadas, pero no renunciar a su ejecución (Cuadro 1).

Es de tener en cuenta que la dificultad técnica que entraña indudablemente el paso de la Bahía, fue resuelta hace ya 75 años, con la construcción del Puente múltiple sobre la Bahía "San Francisco–Oakland Bay Bridge", factible mediante la ejecución de un gran apoyo intermedio al que se refieren los enormes esfuerzos de anclaje de dos puentes colgantes adyacentes (Figura 2).

## *1. INTRODUCTION*

*The FARWEST Project involves building the San Francisco Airport–Sacramento Roseville HSL crossing San Francisco Bay ("Bay Crossing Alternative"), as the end landmark to culminate the State of California's high speed railway (CHSRS), as provided for by the United States Federal high speed railway (USHSRS) plan (Figure 0).*

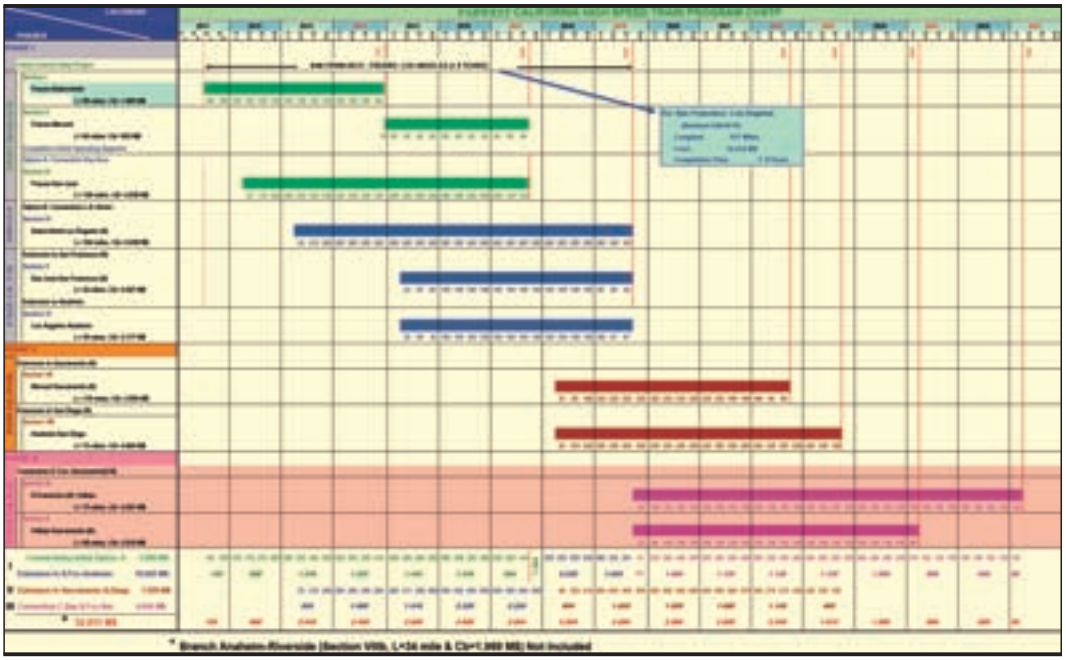
*Not provided for in the Authority's network planning, this line is addressed in the FARWEST Project approach as necessary for the optimum, complete operation of the California high speed railway system, connecting with the capital, Sacramento, and all the large cities (San Francisco, Fresno, Los Angeles and San Diego) to each other and the State's urban areas (Bay Area, Great Valley, Southern California), in preparation for the high speed connections planned in the USHSRS with that of the adjacent State of Nevada (NHSRS): Las Vegas, by "Dessert Express" and Reno, via "Tahoe Lake" (Figure 1).*

*This line's unit cost is the highest of the whole network at $66.58M/Mile (Table 1) and, therefore, in view of the world economy, should be scheduled for more advanced stages but without abandoning its execution (Graph 1).*

*It must be borne in mind that the technical difficulty that crossing the Bay undoubtedly involves was solved 75 years ago with the building of the multiple Bridge over the Bay, the "San Francisco–Oakland Bay Bridge", made feasible by building a large intermediate support to which the enormous anchoring stresses of the two adjacent suspension bridges relate (Figure 2).*

**FIGURA/E 0.** Adaptación de la CHSRS a la USHSR según el Proyecto Farwest / *CHSRS adaptation to USHSR by Farwest Projectt.*

**FIGURA/E 1.** La CHSRS según la planificación de la Authority y el Proyecto Farwest / *Overview of the CHSRS Authority plan. From Farwest Project.*



**CUADRO 1/ *GRAPH 1.*** Adaptación de la Programación de la CHSRS según el Proyecto FARWEST (Miles y M$) / *CHSTP Plan Adaptation according to the FARWEST Project (Miles y M$).*

| OTHER PHASES CALIFORNIA HIGH-SPEED TRAIN PR (CHSRP) | | | | CALIFORNIA HIGH-SPEED RAIL SYSTEM | |
|---|---|---|---|---|---|
| Units | Sections / Items Charac. | Phase II Extension Section IX & X San Francisco-Sacramento | | TOTAL SYSTEM CHSRS | |
| Mile | Total Length Section | 103,8 | (12,97%) | 800 | (100,00%) |
| Mile (%) | Length of Cut & Fill areas | 52,2 | (50,30%) | 483 | (60,36%) |
| Mile (%) | Overall Length of Tunnels | 37,9 | (36,53%) | 253 | (31,56%) |
| Mile (%) | Overall Length of Viaducs | 13,7 | (13,17%) | 66 | (8,07%) |
| Internal Station | Localisation of Int.Station | VALLEJO | | GILROY/ MODESTO/ OCEANSIDE/ RIVERSIDE / VALLEJO | |
| Number (E/Sint) | TSAP/PIB (PAET/BIP) / (Line + Station) | 8 | (6+2) | 39 | (23+16) |
| Mile/h | Average Speed | 183 | | 170 | |
| Mm³ | Earth Moving (Overall section) | 60,26 | | 272,22 | |
| Mm³ | from excavation | 2,43 | | 36,75 | |
| Mm³ | from fill | 49,21 | | 178,68 | |
| Mm³ | from tunnels | 8,62 | | 56,79 | |
| Mm³ | after compensate (excep.specifics) | -38,16 | | -85,14 | |
| Mm³ | Deficit (-) | -46,78 | | -151,05 | |
| Mm³ | Excess to dump (+) | 8,62 | | 65,91 | |
| Number | Overall tunnels by section | 13 | | 51 | |
| nb (Mile) | Long tunnels ( ≥3 ,7 Mile) | 4 | (24,74) | 27 | (212,46) |
| nb (Mile) | Shorts tunnels (≤ 1,25 Mile) | 1 / 3 | | 4 / 6 | |
| Mile | Length of long tunnels | 8,7 / 8,1 / 4,2 / 3,7 | | 4x(17,1 / 11,9)+10x(10,1 / 6,4)+13x(6,4 / 6,2) | |
| m² | Construction works (Overall) | 335.770 | | 1.572.115 | |
| nb-m² | Viaducs | 12 | 310.520 | 74 | 1.491.960 |
| nb-m² | Others Bridges | 28 | 25.250 | 121 | 80.015 |
| nb-m² | Arch (200m span) bridges | 3 | 9.000 | 45 | 135.000 |
| nb-Mile | Suspension (800 m span) bridges | 3 | 8 | 13 | 17,95 |
| M$ | Construction budget (A+B+C+D+E+F+G) | 6.910 | (19,85%) | 34.820 | (100,00%) |
| M$ | Earth moving (a) | 883 | | 3.801 | |
| M$ | Tunnels (b) | 2372 | | 15.212 | |
| M$ | Construction works ( c) | 2328 | | 6.748 | |
| M$ | A - Infraestructure (a+b+c) | 5583 | | 25.761 | |
| M$ | B - Overstructure | 356 | | 2.764 | |
| M$ | C - Equipments | 426 | | 3.424 | |
| M$ | D - Environmental Protection | 113 | | 570 | |
| M$ | E - Design, Q/C, Management. | 162 | | 802 | |
| M$/Mile | Unit cost (included Stations) | 66,58 | | 43,50 | |
| FOM M$/Mile | Unit eficiency Cost (FOM Ministry Spain Ref.2010) | 36,04 | | 26,38 | |
| Mark | Relief-Type-Nature | VS - 2 - Mar.Ur | | - 2 - | |
| M$/Mile | Supplement FOM by big span Viaducs & long tunnels | (B) 9,87 / 8,47 (Tu) | | (B) 4,60 / 11,17 (Tu) | |
| M$/Mile | Average Overall FOM Cost unit | 54,38 | | 42,15 | |
| M$ | F - Supplemet Construction budget by Stations & Building TSAP | 253 | | 1.407 | |
| M$ | G - Supplements Cosnstruction budget by equip/Env/Design, QC, Manage for Stations & Buiding TSAP | 17 | | 91 | |
| M$ | Overall Cost Line / Stations | 6.640 | 270 | 33.321 | 1.499 |

**TABLA/E 1.** CHSRS - Resumen (Proyecto FARWEST–Miles y M$) / *CHSRS - Summary (FARWEST Project–Miles y M$).*

**FIGURA/E 2.** San Francisco–Oakland Bay Bridge, completed in late 1936. (Fuente: State of California 1934) / *San Francisco–Oakland Bay Bridge, completed in late 1936. (Source: State of California 1934).*

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA HSR SAN FRANCISCO–SACRAMENTO "BAY CROSSING ALTERNATIVE"

### 2.1. TRAYECTO URBANO EN SAN FRANCISCO

La alternativa "Golden Gate" de la línea Fresno–San Francisco termina en la HSR San Francisco Airport Station, situada en una parcela de forma triangular entre la Hwy 101 Bay Shore y la Huntington Avenue en San Bruno, junto al Aeropuerto Internacional de San Francisco (Figura 3). La

## *2. DESCRIPTION OF THE SAN FRANCISCO–SACRAMENTO "BAY CROSSING ALTERNATIVE" HSR LINE*

### *2.1. URBAN ALIGNMENT IN SAN FRANCISCO*

*The Fresno–San Francisco line's "Golden Gate" alternative ends at the San Francisco Airport HSR Station located on a triangular shaped plot of land between Hwy 101 Bay Shore and Huntington Avenue in San Bruno, next to the San Francisco International Airport (Figure 3). The new line commen-*

**FIGURA/E 3.** HSR San Francisco Airport Terminal Station / *HSR San Francisco Airport Terminal Station.*

**FIGURA/E 4.** Línea HSR "BCA" Trayecto urbano en San Francisco / *"BCA" HSR Line San Francisco Urban Section.*

nueva línea se inicia en esta estación (pk≈272+100) y llega en este trayecto hasta la costa norte de la península de San Francisco, en las proximidades del simbólico puente colgante Golden Gate, muy cerca del nudo que enlaza la Hwy 101 con la interestatal 1 (Veterans Boulevard) a la salida del túnel General Douglas Mac Arthur (Figura 4).

Es un tramo urbano, gran parte en túnel, conectando con otras redes de transporte, principalmente la MUNI, en la SAN FRANCISCO Forest Hill MO Station en Midtown Terrace, para el servicio de cercanías del área de la bahía (Figura 4). Pasa en túnel bajo los "Golden Gate Park" y "Presidio Golf Course", para salir a superficie a la cota 40 en el pk 292+100, después de pasar bajo la 101 DOYLE DRIVE (Figura 4).

El inicio del tramo se hace soterrando la traza y con un viaducto urbano, para entrar a continuación en túnel (TU 1, de 4,2 Km), desde la estación también subterránea de San Francisco Airport, bajo DALY CITY, en la zona de San Bruno (Figura 5). Atraviesa San Bruno Mountain State & County Park, para salir a superficie un pequeño tramo, una vez cruzada la Bay Area Rapid Transit Line (BART), la Hwy 280 (John F. Foran Fwy) y la San José Avenue con la MUNI METRO M .

Tras un tramo deprimido, a cielo abierto por motivos de seguridad y rescate, entra de nuevo en túnel (TU 2, de 3 Km) bajo el City College of San Francisco, Phelan Avenue, Monterey Boulevard, Mount Davidson Park Portola Drive, Miraloma Park y Estación HSR de San Francisco, conectada con la estación MUNI Metro de Forest Hill en Midtown Terrace, y haciendo servicio de PAET anterior al cruce de la Bahía.

El trazado continúa bajo Clarendon Avenue, bordeando por el Este Laguna Honda Reservoir, bajo Warren Drive y Parnassus Avenue en la alineación de la 5th Avenue, por donde continúa a cielo abierto hasta Lincoln Way, donde radica la entrada del túnel TU 3, de 6,75 Km, que atraviesa Golden Gate Park en amplias curva y contracurva para cambiar de alineación a la de la 6th Avenue, por donde continúa en túnel artificial (cut & cover), con un tramo a cielo abierto, también por motivos de seguridad, evacuación en su parte final (por Lake Street West Pacific Avenue).

Otro túnel (TU 4, de 6 Km) pasa en el distrito "Presidio of San Francisco" bajo el Golf Course, Boulevard Lincoln y 101 Doyle Drive, hasta salir a superficie, por su boca norte (Portal Bahía), como se ha comentado anteriormente, en el arranque del Viaducto 1 que da origen al segundo trayecto de esta línea (Figuras 4 y 5).

*ces at this station (≈272+100 Km reference stake) and on this route, arrives at the north coast of the San Francisco peninsula in the vicinity of the symbolic Golden Gate suspension bridge, very near to the junction linking Hwy 101 and the Interstate 1 (Veterans Boulevard) at the exit of the General Douglas Mac Arthur tunnel (Figure 4).*

*This is an urban section with a large part running through a tunnel, connecting with other transport systems, mainly the MUNI, at the SAN FRANCISCO Forest Hill MO Station in Midtown Terrace, for the Bay area's commuter service (Figure 4). It runs in a tunnel under "Golden Gate Park" and "Presidio Golf Course", to reappear on the surface at elevation 40 at 292+100 Km reference stake, after passing under the 101 DOYLE DRIVE (Figure 4).*

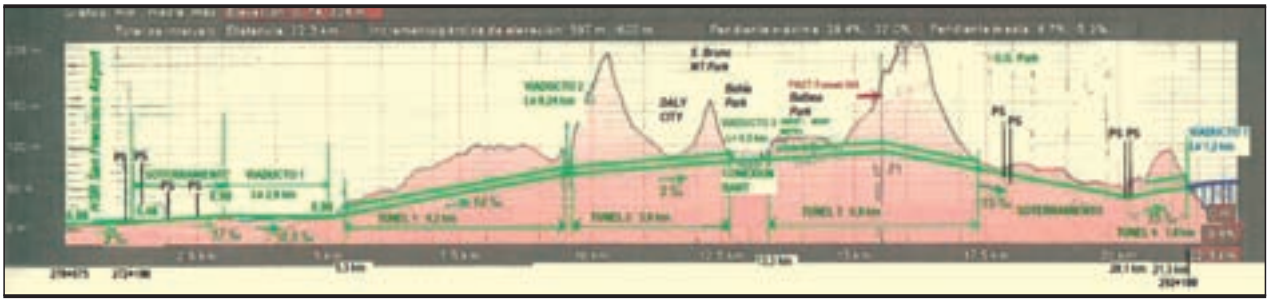
*The section commences with the alignment running underground and with an urban viaduct to then enter a tunnel (the 4.2 km long TU 1) from the also underground San Francisco Airport station, under DALY CITY, in the San Bruno area (Figure 5). It runs through San Bruno Mountain State & County Park for a short section to then reappear on the surface, having crossed the Bay Area Rapid Transit Line (BART), Hwy 280 (John F. Foran Fwy) and San José Avenue with the MUNI METRO M.*

*After a section in a depression out in the open for safety and rescue reasons, it re-enters a tunnel (the 3 km long TU 2) under the City College of San Francisco, Phelan Avenue, Monterey Boulevard, Mount Davidson Park Portola Drive, Miraloma Park and the San Francisco HSR station connected with the MUNI Metro Forest Hill station at Midtown Terrace and providing a PAET service before crossing the Bay.*

*The alignment continues under Clarendon Avenue, edging round the Este Laguna Honda Reservoir, under Warren Drive and Parnassus Avenue in the 5th Avenue alignment where it continues in the open to Lincoln Way, where it enters the 6.75 m long TU 3 tunnel crossing Golden Gate Park in wide and reverse bends to change alignment to the 6th Avenue's where it continues in a cut and cover tunnel with an open air section, also for safety and evacuation reasons, at its end (through Lake Street and West Pacific Avenue).*

*Another tunnel (the 6 Km long TU 4) runs in the Presidio of San Francisco" district under the Golf Course, Boulevard Lincoln and 101 Doyle Drive, to surface at its north portal (Bay Portal) as mentioned earlier, at the start of Viaduct 1 giving rise to this line's second route (Figure 5).*

**FIGURA/E 5A.** Planta Geológica Línea HSR "BCA" Trayectos San Francisco urbano y cruce de la Bahía / *Geological Ground plan "BCA" San Francisco urban section and the Bay Cross.*




**FIGURA/E 5B.** Perfil Trayecto urbano "San Francisco Line HSR "BCA" / *"BCA" Urban Section of the San Francisco HSR Line.*

## 2.2. TRAYECTO SAN FRANCISCO–RICHMOND (CRUCE DE LA BAHIA)

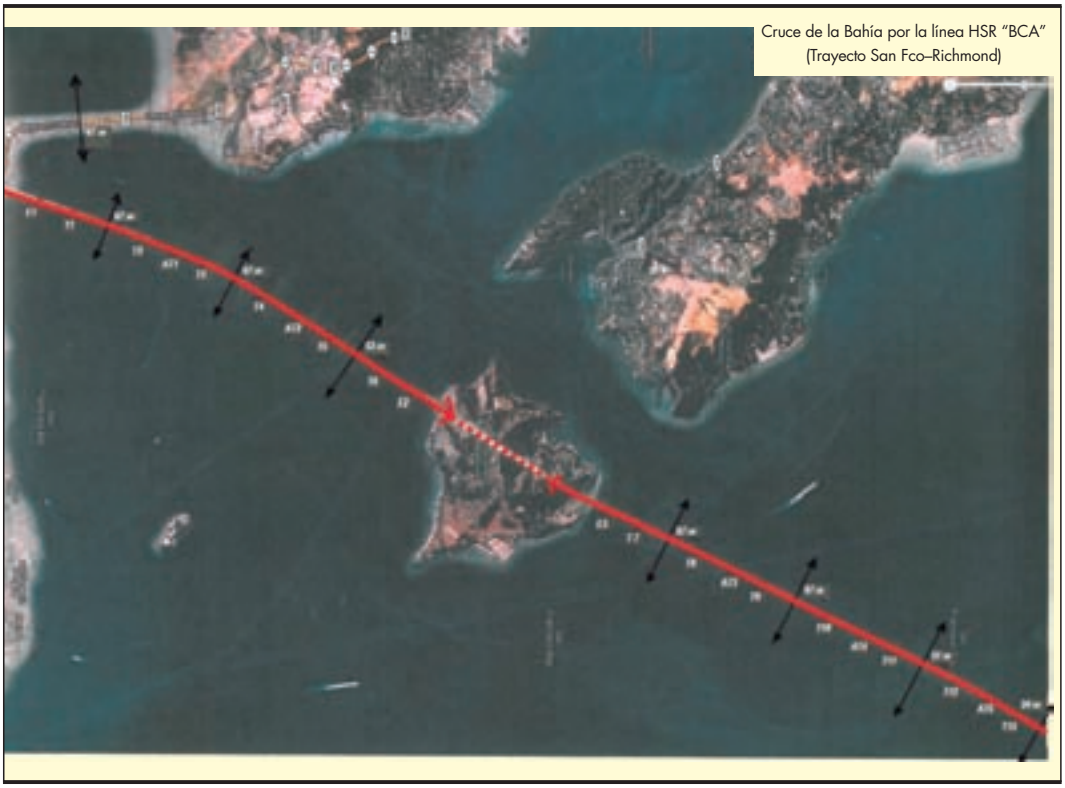
La construcción de este trayecto representa la obra de ingeniería más importante y de marco más espectacular de todas las redes de transporte de California y particularmente de la alta velocidad ferroviaria CHSRS.

En el cruce de la Bahía por la línea de alta velocidad San Francisco–Sacramento, se pueden distinguir las siguientes unidades morfológicas y estructurales (Figura 6).

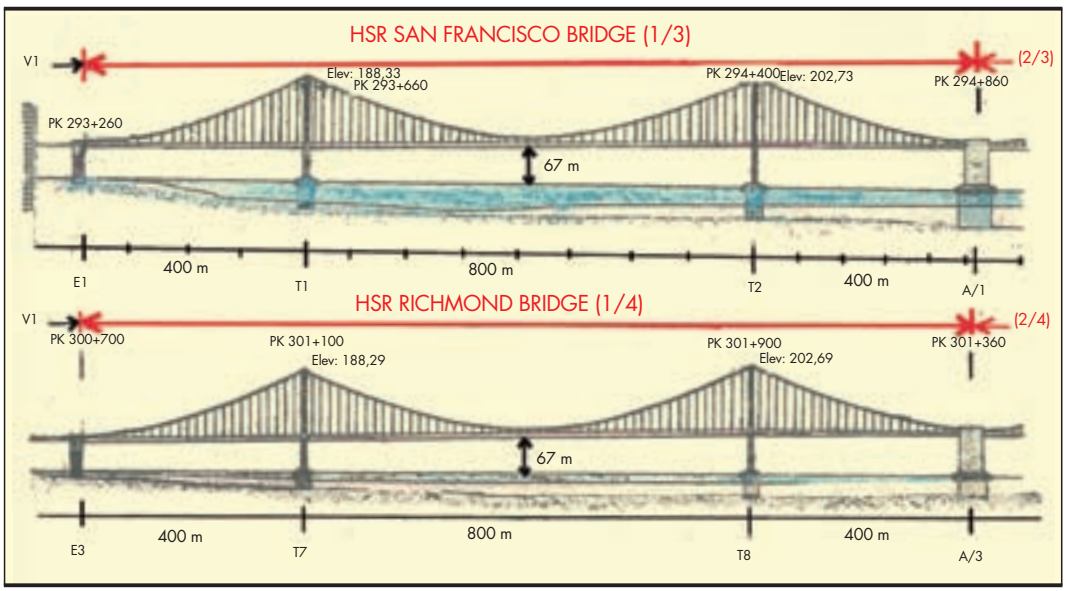
## *2.2. SAN FRANCISCO–RICHMOND ALIGNMENT (BAY CROSSING)*

*The construction of this alignment represents the major piece of engineering and the most spectacular framework of all California's transit systems and, particularly, the CHSRS high speed railway's.*

*The following morphological and structural units may be highlighted in the San Francisco–Sacramento high speed line's Bay crossing (Figure 6).*




**FIGURA/E 6A.** Cruce de la Bahía por la Línea HSR "BCA", Trayecto San Francisco–Richmond / *Cross of the Bay by "BCA" HSR Line. San Francisco–Richmond Section.*




**FIGURA/E 6B.** Alzados parciales de los Puentes Colgantes del Cruce de la Bahía por la Línea HSR "BCA" (Trayecto San Francisco–Richmond) / *Partial profiles.Bay Crossing of HSR "BCA" Line Suspension Bridges (Subsection San Francisco–Richmond).*

*1 – PASO 1 DE LA BAHÍA*

1.1 – VIADUCTO 1 "ACCESO SAN FRANCISCO PRESIDIO" L = 1.100 m (pk 292+140 a 293+240).

- 11 Vanos de tramo recto, de 100 m de luz.
- Planta curva centro derecha de gran radio.
- Rasante en rampa de +18milésimas. Cotas rasante: EA 40,97 m E11 60,77 m.

1.2 – PUENTE COLGANTE MÚLTIPLE "HSR SAN FRANCISCO" L = 4.800 m (pk 293+260 a 298+060).

- 3 Puentes colgantes de tres vanos (400-800-400) alineados, con anclaje común entre cada dos.
- Planta curva transición-recta-transición inversa.
- Rasante en rampa de +18 milésimas (1.600 m)/ en pendiente de –18 milésimas (3.200 m). Cotas rasante: E12 61,13 m E21 46,73 m.
- Gálibo de navegación en centro de vanos: T1-T2 67 m T3-T4 67 m T5-T6 53m .

1.3 – VIADUCTO 2 "ACCESO SUR ANGEL ISLAND" L = 500 m (pk 298+080 a 298+580).

- 5 Vanos de tramo recto de 100 m de luz.
- Planta curva centro izquierda de gran radio.
- Rasante en pendiente de –18 milésimas. Cotas de rasante: E22 46,37 m EB 37,37 m.

*2 – TÚNEL "ANGEL ISLAND"*

- Túnel excavado con TBM L=1.160 m (pk 298+620 a 299+780).
- Planta en doble transición, con rasante en rampa de + 8 milésimas
- Portal Sur (298+620). Cota de rasante: 37,37 m.
- Portal Norte (299+780). Cota de rasante: 46,33 m.

*3 – PASO 2 DE LA BAHÍA*

3.1 – VIADUCTO 3 "ACCESO NORTE ANGEL ISLAND" L = 800 m (pk 299+880 a 300+680).

- 8 Vanos de 100 m de tramo recto de 100 m de luz.
- Planta curva centro izquierda de gran radio,
- Rasante en rampa de +18 milésimas. Cotas de rasante : EC 46,33 m E31 60,73 mç

3.2 – PUENTE COLGANTE MÚLTIPLE "HSR RICHMOND" L = 6.400 m (300+700 a 307+100).

- 4 Puentes colgantes de tres vanos (400-800-400) alineados, con un anclaje común entre cada dos.
- Planta curva transición–recta–recta–recta.
- Rasante en rampa de +18 milésimas (1.600 m)/ en pendiente de –11,6 milésimas (4.600 m). Cotas de rasante: E32 61,09 m E41 34,37 m.
- Gálibo en centro de vanos :T7-T8 67 m T9-T10 67 m T11-T12 51 m T13-T14 34 m.

3.3 – VIADUCTO 4 "ACCESO POINT RICHMOND" L = 400 m (pk 307+120 a 307+520)

- 4 vanos de tramo recto de 100 m de luz.
- Planta recta.
- Rasante en pendiente de –10,5 milésimas. Cotas de rasante : E42 34,16 m ED 29,92 m.

*1 – BAY CROSSING 1*

*1.1 – VIADUCT 1 "SAN FRANCISCO PRESIDIO ACCESS" L = 1,100 m (292+140 to 293+240 Km reference stake).*

- *11 Straight section bridge span, (100 m).*
- *Large radius centre right curved plan*
- *Ramp grade of +18 thousandths. Grade elevations: EA 40.97 m E11 60.77 m.*

*1.2 – "SAN FRANCISCO HSR" MULTIPLE SUSPENSION BRIDGE L = 4,800 m (293+260 to 298+060 Km reference stake).*

- *3 in-line three-arch suspension bridges (400-800-400), with common anchorage between every two.*
- *In plan, transition bend–straight–reverse bend.*
- *Ramp grade of +18 thousandths (1,600 m) / in a gradient of –18 thousandths (3,200 m).*
- *Grade elevations: E12 61.13 m E21 46.73 m.*
- *Sailing headroom at arch centers: T1-T2 67 m T3-T4 67 m T5-T6 53 m.*

*1.3 – VIADUCT 2, "SUR ANGEL ISLAND ACCESS" L = 500 m (298+080 to 298+580 Km reference stake).*

- *5 Straight section arches span (100 m).*
- *Large radius left center bend in plan.*
- *Gradient grade of –18 thousandths: E22 46.37 m EB 37.37 m.*

*2 – "ANGEL ISLAND" TUNNEL*

- *TBM excavated tunnel L =1,160 m. (298+620 to 299+780 Km reference stake).*
- *Dual transition in plan with ramp grade of + 8 thousandths.*
- *South Portal (298+620). Grade elevation: 37.37 m.*
- *North Portal (299+780). Grade elevation: 46.33 m.*

*3 – BAY CROSSING 2*

*3.1 – VIADUCT 3, "ANGEL ISLAND NORTH ACCESS" L = 800 m (299+880 to 300+680 Km reference stake).*

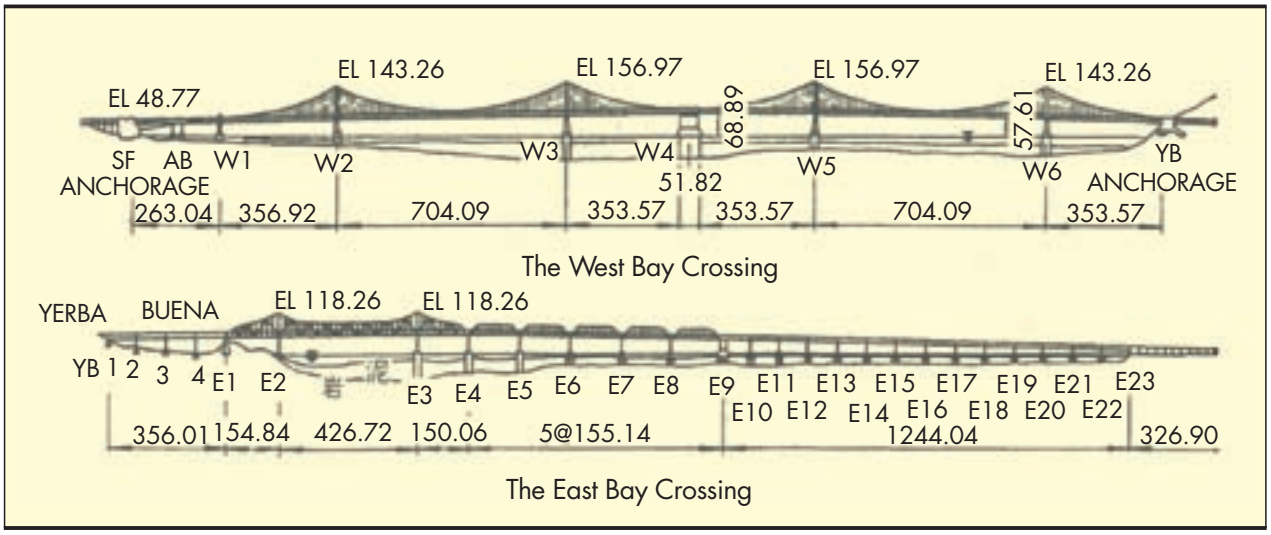
- *8 100 m-span, 100 m straight section arches.*
- *Large radius centre left bend in plan.*
- *Ramp grade of +18 thousandths Grade elevations: EC 46.33 m E31 60.73 m.*

*3.2 – "RICHMOND HSR" MULTIPLE SUSPENSION BRIDGE L = 6,400 m (300+700 to 307+100).*

- *4 three-arch suspension bridges (400-800-400) in line, with a common anchor between every two.*
- *In plan transition curve–straight–straight–straight.*
- *Ramp grade of +18 thousandths (1,600 m) / in a gradient of –11.6 thousandths (4,600 m) Grade elevations: E32 61.09 m E41 34.37 m.*
- *Headroom at arch centers: T7-T8 67 m T9-T10 67 m T11-T12 51 m T13-T14 34 m.*

*3.3 – VIADUCT 4, "RICHMOND ACCESS POINT" L = 400 m (307+120 to 307+520 Km reference stake).*

- *4 straight stretch arches with 100 m span.*
- *Straight in plan.*
- *Grade in a gradient of –10.5 thousandths. Grade elevations: E42 34.16 m ED 29.92 m.*




**FIGURA/E 7.** San Francisco–Oakland Bridge, plano original (Fuente: U.S. Steel (1936) con permiso de la American Bridge Co) / *Original Plan (Source: U.S. Steel (1936) with American Bridge Co authorization.*

La longitud de este trayecto es de 15.480 m, entre el portal Bahía del Túnel Presidio de San Francisco (pk 292+100) hasta el portal Bahía del Túnel artificial Point Richmond (307+580). El trayecto, según la descripción anterior, sería la conexión de mayor longitud sobre la Bahía. Morfológicamente, está constituida por las siguientes unidades:

- 11,28 Km en puente colgante múltiple con vanos de 800m de luz principal.
- 2,90 Km en viaductos de acceso, con vanos de tramo recto de 100m de luz.
- 1,30 Km en túnel y trincheras de acceso al túnel en Angel Island.

La conexión San Francisco–Oakland Bay Bridge, inaugurada en Noviembre de 1936, tiene una longitud total de 13,20 Km, que incluye 3,2 Km de puente colgante múltiple con vanos de 704 m, en el cruce Oeste de la Bahía, paso con túnel en la isla Yerba Buena, 1,5 Km de puente de cerchas metálicas en voladizos sucesivos de 427 m de luz, 1,6 Km de accesos, con vanos de 90 m en el cruce Este de la Bahía y otras secciones sobre el agua y terrestres (Figura 7).

La rasante en este trayecto, San Francisco–Richmond, se ha determinado de forma que respete el gálibo de navegación, limitado por el Golden Gate que cierra la Bahía, dejando bajo su estructura, 67 m de altura libre para el paso de los grandes barcos que acceden y pasan a través de la bahía.

En los Cuadros 2 a 7 adjuntos se especifican las magnitudes características de todos y cada uno de los apoyos (estribos E, pilas P, torres T, anclajes intermedios AI) en sus secciones por el eje, origen o final, pk de la línea Fresno–San Francisco–Sacramento, cota de rasante, máxima elevación, altura total sobre el fondo de la bahía "ht", calado medio (bajo cota 0) de agua "yw", altura sobre el fondo de la bahía del nivel de vía "H", altura sobre el fondo de la bahía, del nivel de apoyo del tablero "h", espesor de fangos o sedimentos "hc", altura sobre el nivel de cimiento "hd", y tipo de cimentación (representación gráfica en el croquis adjunto (Figura 8).

*This route is 15,480 m, between the Presidio de San Francisco Tunnel Bay portal (292+100 Km reference stake) to the cut and cover Point Richmond tunnel's Bay portal (307+580). According to the foregoing description, the alignment would be the longest connection over the Bay. Morphologically speaking, it is formed by the following units:*

- *11.28 Km over a multiple suspension bridge with 800 m main span arches.*
- *2.90 Km over access viaducts with straight section arches with 100 m span.*
- *1.30 Km in a tunnel and deep access cuts to the tunnel on Angel Island.*

*Opened in November 1936, the San Francisco–Oakland Bay Bridge connection is 13.29 Km long overall, which includes 3.2 Km of a multiple suspension bridge with 704 m arches, in the West Bay crossing, tunnel running in Yerba Buena island, 1.5 Km of a metal truss bridge in successive cantilevers of 427 m span, 1.6 Km of accesses, with 90 m arches in the East Bay crossing and other sections over water and land (Figure 7).*

*This San Francisco–Richmond alignment's grade was determined such that it respects shipping limit gage, limited by the Golden Gate closing off the Bay, leaving 67 m headroom below its structure for large vessels accessing and crossing the Bay to sail under.*

*Tables 2 to 7 attached specify the characteristic sizes of each and every one of the supports (abutments E, piers P, towers T, intermediate anchors AI) in their sections through the centre line, origin or final, reference stake of the Fresno–San Francisco–Sacramento line, grade elevation, maximum elevation, overall height above the Bay's bed "ht", average depth (below elevation 0) of water "yw", height of the track level above the bay's bed "H", height of the deck support level above the bay's bed, "h", mud or sediment thickness "hc", height above the foundation level´ "hd", and type of foundations (graphic representation in the attached diagram (Figure 8).*

| CARACTERÍSTICAS / APOYO | pK | Cota Rasante | h (Max. elevation) (m) | $h_{mud/sedim}$ (m) | $Y_w$ (m) | $H_T$ (m) | $h_d$ (m) | H (m) | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E A (End) | 292+140 | 40,97 | 6 | 0 | 0 | | | | Direct Foundation |
| P 1 (Axe) | 292+240 | 42,77 | 7 | 1 | 0 | | | | Direct Foundation |
| P 2 (Axe) | 292+340 | 44,57 | 28 | 1 | 0 | | | | Direct Foundation |
| P 3 (Axe) | 292+440 | 46,37 | 31 | 5 | 0 | | | | Dir Foundat (Exc & pumping) |
| P 4 (Axe) | 292+540 | 48,17 | 34 | 4 | 0 | | | | Dir Foundat (Exc & pumping) |
| P 5 (Axe) | 292+640 | 49,97 | 39 | 6 | 1 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| P 6 (Axe) | 292+740 | 51,77 | 42 | 4 | 1 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| P 7 (Axe) | 292+840 | 53,57 | 47 | 7 | 2 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| P 8 (Axe) | 292+940 | 55,37 | 50 | 8 | 2 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| P 9 (Axe) | 293+040 | 57,17 | 52 | 8 | 2 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| P 10 (Axe) | 293+140 | 58,97 | 54 | 6 | 2 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| E 1 (Origin) | 293+240 | 60,77 | 60 | 6 | 3 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |

**CUADRO/ TABLE 2.** Bay Crossing Viaduct 1 "San Francisco Presidio Access" L = 1.100 m (11x100) i = +18‰. /
*Bay Crossing Viaduct 1 "San Francisco Presidio Access" L = 1100 m (11x100) i = +18‰.*

| CARACTERÍSTICAS / APOYO | pK | Cota Rasante | h (Max. elevation) (m) | $h_{mud/sedim}$ (m) | $Y_w$ (m) | $H_T$ (m) | $h_d$ (m) | H (m) | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E 1 (End) | 293+260 | 61,13 | 64,13 | 6 | 3 | 67 | 55,5 | 64 | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| T 1 (Axe) | 293+660 | 68,33 | 188,33 | 10 | 36 | 200 | 71,5 | 40 | Direct Foundation by Caisson |
| T 2 (Axe) | 294+460 | 82,73 | 202,73 | 20 | 32 | 210 | 81,5 | 50 | Direct Foundation by Caisson |
| Al 1 (Axe) | 294+860 | 82,73 | 85,73 | 32 | 28 | 90 | 78,5 | 58 | Direct Foundation by Caisson |
| T 3 (Axe) | 295+260 | 82,73 | 202,73 | 35 | 25 | 219 | 81,5 | 55 | Direct Foundation by Caisson |
| T4 (Axe) | 296+060 | 68,33 | 188,33 | 35 | 25 | 200 | 71,5 | 55 | Direct Foundation by Caisson |
| Al 2 (Axe) | 296+460 | 68,33 | 71,33 | 32 | 22 | 70 | 58,5 | 50 | Direct Foundation by Caisson |
| T 5 (Axe) | 296+860 | 68,33 | 188,33 | 25 | 22 | 190 | 69,5 | 38 | Direct Foundation by Caisson |
| T 6 (Axe) | 297´660 | 53,93 | 173,93 | 15 | 12 | 180 | 51,5 | 23 | Direct Foundation by Caisson |
| E 2 (Origin) | 298+060 | 46,73 | 49,73 | 6 | 5 | 69 | 57,5 | 64 | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |

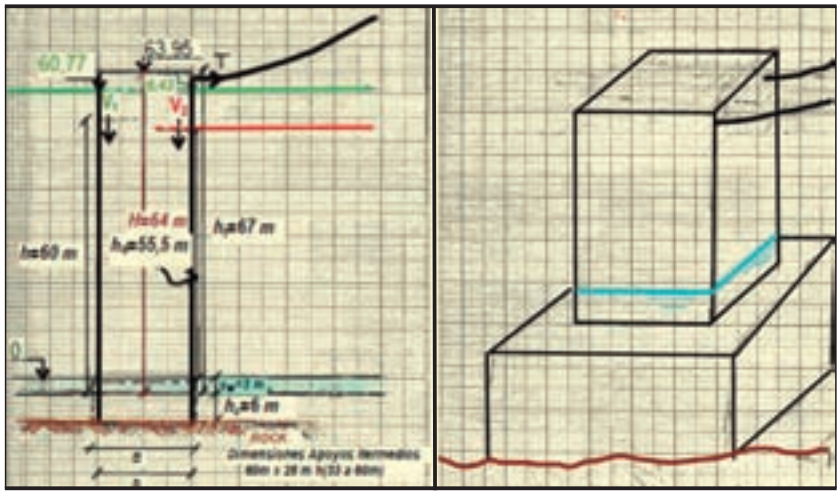
**CUADRO/ TABLE 3.** Bay Crossing (3) Suspension Bridge "Hsr San Francisco"L = 4.800 m (3 x (400+800+400)) i = ±18‰ /
*Bay Crossing (3) Suspension Bridge "Hsr San Francisco" L = 4800 m (3x(400+800+400)) i = ±18‰.*

| CARACTERÍSTICAS / APOYO | pK | Cota Rasante | h (Max. elevation) (m) | $h_{mud/sedim}$ (m) | $Y_w$ (m) | $H_T$ (m) | $h_d$ (m) | H (m) | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E 2 (End) | 298+080 | 46,37 | 46 | 6 | 5 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| P 1 (Axe) | 298+180 | 44,57 | 39 | 5 | 3 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| P 2 (Axe) | 298+280 | 42,77 | 37 | 2 | 2 | | | | Dir Found (Artifcial Island & pumping) |
| P 3 (End) | 298+380 | 40,97 | 33 | 2 | 1 | | | | Dir Found (Artifcial Island & pumping) |
| P 4 (Axe) | 298+480 | 39,17 | 30 | 2 | 0 | | | | Dir Foundation (Exc & pumping) |
| E B (Origin) | 298+580 | 37,37 | 10 | 2 | 0 | | | | Direct Foundation |

**CUADRO/ TABLE 4.** Bay Crossing Viaduct 2 "Angel Island Access South" L = 500 m (5x100) i = –18‰ /
*Bay Crossing Viaduct 2 "Angel Island Access South" L = 500 m (5x100) i = –18‰.*

| CARACTERÍSTICAS / APOYO | pK | Cota Rasante | h (Max. elevation) (m) | $h_{mud/sedim}$ (m) | $Y_w$ (m) | $H_T$ (m) | $h_d$ (m) | H (m) | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E C (End) | 299+880 | 46,33 | 22 | 0 | 0 | | | | Direct Foundation |
| P 1 (Axe) | 299+980 | 48,13 | 27 | 0 | 0 | | | | Direct Foundation |
| P 2 (Axe) | 300+080 | 49,93 | 33 | 1 | 0 | | | | Direct Foundation |
| P 3 (Axe) | 300+180 | 51,73 | 34 | 5 | 0 | | | | Direct Foundation |
| P 4 (Axe) | 300+280 | 53,33 | 38 | 5 | 0 | | | | Direct Foundation |
| P 5 (Axe) | 300+380 | 55,33 | 40 | 6 | 0 | | | | Dir Found (Exc & pumping) |
| P 6 (Axe) | 300+480 | 57,13 | 47 | 10 | 0 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| P 7 (Axe) | 300+580 | 58,93 | 50 | 8 | 1 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| E 3 (Origin) | 300+680 | 60,73 | 66 | 10 | 2 | | | | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |

**CUADRO/ TABLE 5.** Bay Crossing Viaduct 3 "Angel Island Access North" L = 800 m (8x100) i = +18‰ /
*Bay Crossing Viaduct 3 "Angel Island Access North" L = 800 m (8x100) i = +18‰.*




**FIGURA/E 8.** Croquis Nomenclatura magnitudes características de los apoyos (Ej: E1) /
*Scheme of the support characteristic magnitudes nomenclator (Ex: E1).*

| CARACTERÍSTICAS / APOYO | pK | Cota Rasante | h (Max. elevation) (m) | $h_{mud/sedim}$ (m) | $Y_w$ (m) | $H_T$ (m) | $h_d$ (m) | H (m) | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E 3 (End) | 300+700 | 61,09 | 64,09 | 10 | 2 | 71 | 68,5 | 67 | Dir Found (Sheet Piling & pumping) |
| T 7 (Axe) | 301+100 | 68,29 | 188,29 | 15 | 15 | 195 | 66,5 | 25 | Deep Foundation by Caisson |
| T 8 (Axe) | 301+900 | 82,69 | 202,69 | 28 | 15 | 205 | 76,5 | 35 | Deep Foundation by Caisson |
| Al 3 (Axe) | 302+300 | 82,69 | 85,69 | 30 | 15 | 85 | 73,5 | 40 | Deep Foundation by Caisson |
| T 9 (Axe) | 302+700 | 82,69 | 202,69 | 34 | 11 | 205 | 76,5 | 37 | Deep Foundation by Caisson |
| T 10 (Axe) | 303+500 | 68,29 | 188,29 | 32 | 9 | 195 | 66,5 | 35 | Deep Foundation by Caisson |
| Al 4 (Axe) | 303+900 | 68,29 | 71,29 | 30 | 7 | 70 | 58,5 | 35 | Deep Foundation by Caisson |
| T 11 (Axe) | 304+300 | 64,05 | 184,05 | 34 | 6 | 185 | 56,5 | 32 | Deep Foundation by Caisson |
| T 12 (Axe) | 305+100 | 55,57 | 175,57 | 30 | 4 | 180 | 51,5 | 30 | Deep Foundation by Caisson |
| Al 5 (Axe) | 305+500 | 51,33 | 54,33 | 30 | 3 | 55 | 43,5 | 30 | Deep Foundation by Caisson |
| T 13 (Axe) | 305+900 | 47,09 | 167,09 | 30 | 2 | 171 | 42,5 | 30 | Deep Foundation by Caisson |
| T 14 (Axe) | 306+700 | 38,61 | 158,61 | 34 | 2 | 167 | 38,5 | 28 | Deep Foundation by Caisson |
| E 4 (Origin) | 307+100 | 34,37 | 37,37 | 25 | 1 | 58 | 49,5 | 54 | Deep Foundation by Piles |

**CUADRO/ TABLE 6.** Bay Crossing (4) Suspension Bridge "Hsr Richmond L = 6.400 m (4x(400+800+400) i = +18‰/–10‰ /
*Bay Crossing (4) Suspension Bridge "Hsr Richmond L = 6400 m (4x(400+800+400) i = +18‰/–10‰.*

| CARACTERÍSTICAS / APOYO | pK | Cota Rasante | h (Max. elevation) (m) | $h_{mud/sedim}$ (m) | $Y_w$ (m) | $H_T$ (m) | $h_d$ (m) | H (m) | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E 4 (End) | 307+120 | 34,16 | 32 | 25 | 1 | | | | Deep Foundation by Piles |
| P 1 (Axe) | 307+220 | 33,1 | 24 | 22 | 1 | | | | Deep Foundation by Piles |
| P 2 (Axe) | 307+320 | 32,04 | 20 | 15 | 0 | | | | Deep Foundation by Piles |
| P 3 (Axe) | 307+420 | 30,98 | 10 | 12 | 0 | | | | Deep Foundation by Piles |
| E D (Origin) | 307+520 | 29,92 | 6 | 6 | 0 | | | | Direct Foundation |

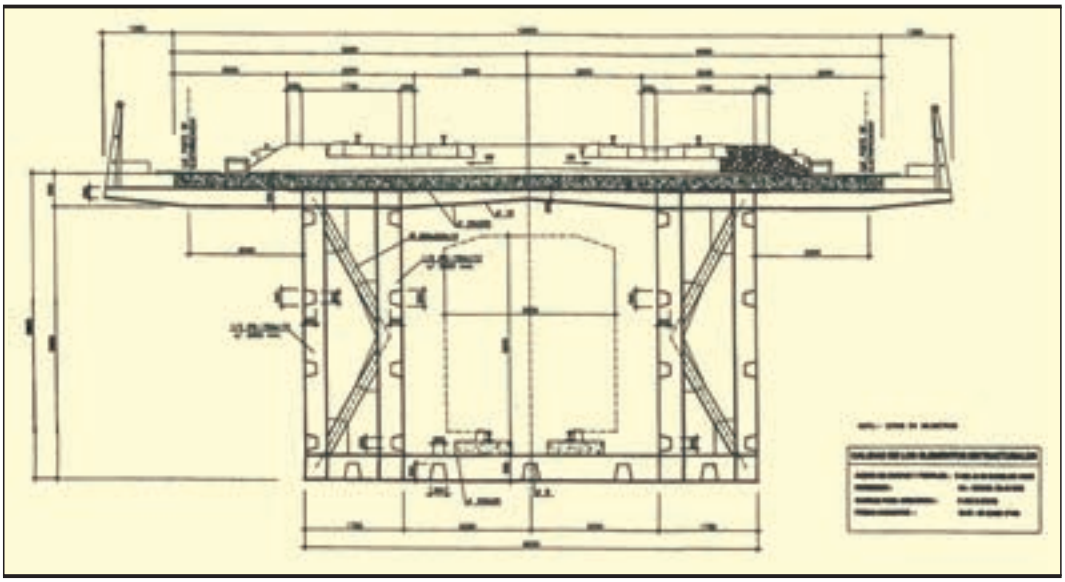
**CUADRO/ TABLE 7.** Bay Crossing Viaduct 4 "Point Richmond Access" L = 400 m (4x100) i = –10,6‰ /
*Bay Crossing Viaduct 4 "Point Richmond Access" L = 400 m (4x100) i = –10,6‰.*

## Consideraciones para el dimensionamiento de los Puentes sobre la Bahía

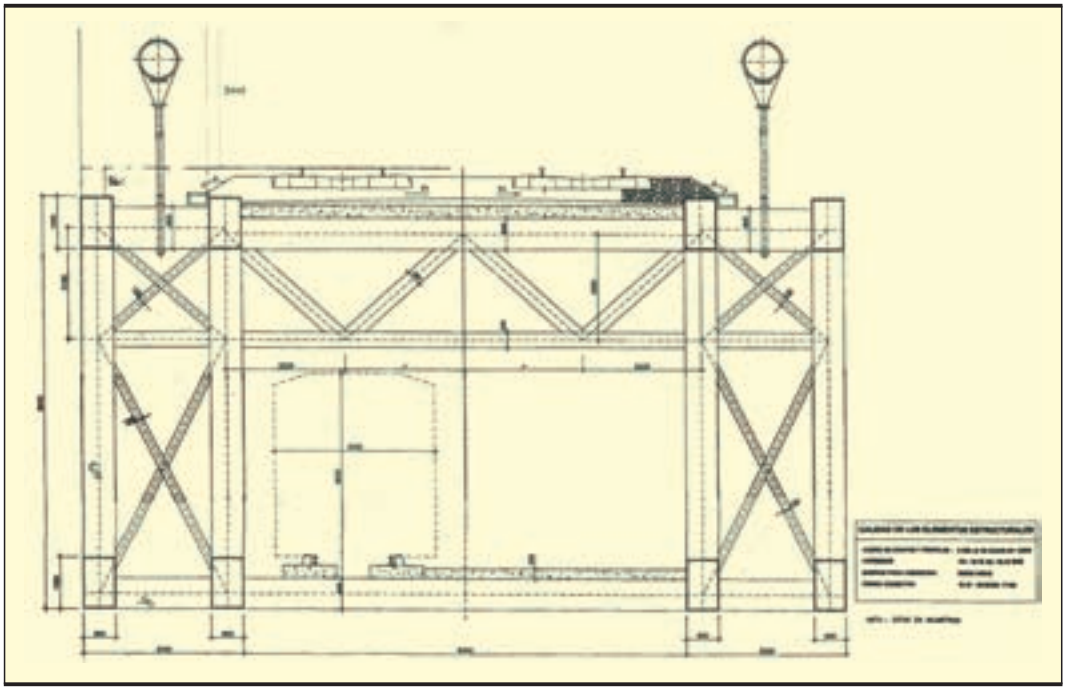
En las Figuras 9a y 9b se definen las secciones tipo estructurales de los viaductos de tramo recto y de puente colgante, tomadas del Anteproyecto de Estructuras del "*Preliminary Design HSR Fresno–San Francisco Golden Gate Alternative*" de los autores de este artículo. La sección del tablero proyectada para los puentes colgantes, con un peso de 889 Kg/m², tiene un canto de 8 m, con un ratio, por tanto, de 1/100 respecto a la luz del vano principal, y con un ancho de 14,3 m (ratio ancho/luz: 1/56). El puente de Tacoma Narrows de 853 m de luz principal, tenía una sección de tablero con unos ratios de 1/350 y 1/72, antes de que colapsara en Noviembre de 1940, cuatro meses después de su apertura, con un viento de

## *Considerations for sizing Bridges over the Bay*

*Figures 9 define the structural type sections of the straight section viaducts and of the suspension bridge, taken from the Structures of the "Preliminary Design, HSR Fresno–San Francisco Golden Gate Alternative" by this article's authors . The deck section designed for the suspension bridges, with a weight of 889 Kg/m², is 8 m depth of girder with a ratio, therefore, of 1/100 with respect to the main arch's span, and with a width of 14.3 m (width/span ratio: 1/56). The 853 m main span Tacoma Narrows bridge had a deck section with ratios of 1/350 and 1/72 before it collapsed in November 1940, four months after it was opened, with a 68 Km/h wind. Ten years later, in*



**FIGURA/E 9A.**
Sección tipo Viaductos de tramo Recto /
*Cross Section of the straight section Viaducts.*



**FIGURA/E 9B.**
Sección tipo Puentes Colgantes /
*Cross Section of the suspension bridges.*

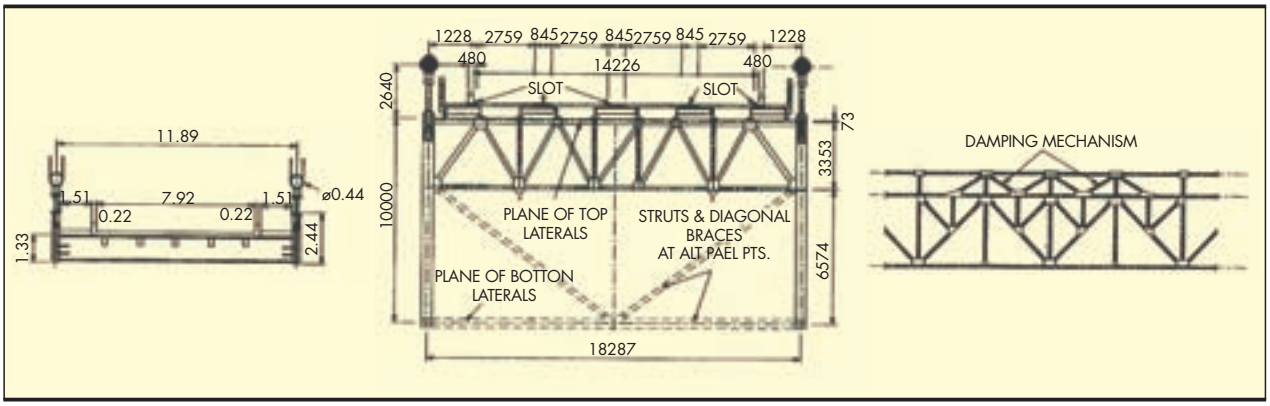



**FIGURA 10.** Medidas aerodinámicas implantadas en el Nuevo Puente de Tacoma / *Aerodynamic measures implemented don the new Tacoma Narrows Bridge.*

68 Km/h. Diez años más tarde, en 1950 fue terminada su reconstrucción, manteniendo su luz principal, pero reforzando las cimentaciones y la rigidez del tablero (Figura 10). Los ratios antes mencionados pasaron a ser de 1/85 (canto/luz) y 1/47 (ancho/luz) en el puente reconstruido, cuyo comportamiento en más de 60 años, ha sido completamente satisfactorio.

De otros grandes puentes colgantes y de los ya comentados, se recogen en el Cuadro 8, los valores de estos ratios y las alturas desde cimiento de los pilonos-torres más altos de cada uno.

Las experiencias habidas con el desastre del puente de Tacoma, los problemas con las vibraciones inducidas por el viento en el Severn Bridge (1966, 988 m de luz, 1/324 ratio canto/luz), las nuevas experiencias de la tecnología inglesa con la terminación en 1981 del Humber Bridge (1410 m, récord mundial de luz; 1/313 ratio canto/luz), con torres de hormigón y el comienzo de la construcción de dos gigantescos puentes colgantes en 1991 (Dinamarca, Storebaelt Bridge, 1964 m de luz) y 1998 (Japón, Akashi Kaikyo Bridge, 1991 m de luz), hacen que no se consideren acepta-

*1950, its rebuilding concluded, keeping its main span but reinforcing the foundations and the deck's rigidity (Figure 10). The aforementioned ratios changed to 1/85 (depth/span) and 1/47 (width span) in the rebuilt bridge which has performed perfectly satisfactorily over more than 60 years.*

*Table 8 shows these ratios and the heights from foundations of the highest pylons-towers of other large suspension bridges and of those already discussed.*

*Experience taken from the Tacoma bridge disaster, problems with wind induced vibrations in the Severn Bridge (1966, 988 m span, 1/324 depth/span ratio), the new English technology experience with the conclusion of the Humber Bridge in 1981 (1410 m, world span record; 1/313 depth/span ratio), with concrete towers and commencement of two gigantic suspension bridges in 1991 (Denmark's Storebaelt Bridge, 1964 m span) and 1998 (Japan's Akashi Kaikyo Bridge, 1991 m span) lead to suspension bridge projects designed with depth/span ratios of less than 1/200 no longer being acceptable.*

| Año | Puente (m) | Luz principal (m) | Ratio Canto/Luz | Ratio Ancho/Luz | Altura de torre (desde cimientos) (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1931 | George Washington | 1067 | 1/100 | 1/33 | 181 |
| 1936 | San Francisco–Oakland | 704 | 1/70 | 1/35 | 157 |
| 1937 | Golden Gate | 1280 | 1/164 | 1/47 | 227 |
| 1950 | Tacoma Narrows (reconst) | 853 | 1/85 | 1/47 | 129 |
| 1957 | Mackinac | 1158 | 1/100 | 1/56 | 168 |
| 1964 | Verrazano Narrows | 1298 | 1/136 | 1/41 | 210 |
| 1966 | Tagus River Lisbon | 1013 | 1/90 | 1/43 | 191 |
| 1998 | Akashi Kaikyo | 1991 | 1/142 | 1/56 | 287 |
| 2011 (design*) | San Francisco–Richmond | 800 | 1/100 | 1/56 | 203 |

**CUADRO/ TABLE 8.** (Source : Tadaki Kawada " History of the Modern Suspension Bridge " ASCE 2010 / Authors).
*El puente ahora proyectado ocuparía el puesto 34 de puentes de mayor luz en el mundo /
*(Source : Tadaki Kawada " History of the Modern Suspension Bridge " ASCE 2010 / Authors)*
**The bridge now being designed would be ranked 34th of the largest span bridges in the world.*

bles proyectos de puentes colgantes con ratios canto/luz, menores de 1/200.

La diferencia en estos ratios influye de gran manera en el peso de la rigidización del tablero. En el Storebaelt Bridge, el peso de acero por $m^2$ de tablero es de 424 $Kg/m^2$ y en el Akashi Kaikyo Bridge es de 760 $Kg/m^2$, si bien hay que tener en cuenta que para el primero de ellos se adoptó una sección aerodinámica en cajón cerrado soldado. Su interior no fue pintado porque se deshumidificó por inyección de aire seco (Gimsing 1998). Otras particularidades del Storebaelt Bridge que lo diferencian de los puentes colgantes anteriores son la no adopción de péndolas inclinadas, como sí se había hecho en el Severn Bridge, para aumentar la rigidez, así como el uso de torres de hormigón (254 m), ya utilizadas anteriormente en el Humber Bridge (156 m de altura).

Por su parte, la ingeniería japonesa, que no tenía un "background" en este campo, adoptó la experiencia americana, sin duda la pionera y más evolucionada del mundo hasta el último cuarto del siglo XX, como su principal fuente de aprendizaje, construyendo así, antes del Akashi Kaikyo Bridge, los siguientes:

| | | |
|---|---|---|
| Kannon Bridge, | 712m | (1973) |
| Innoshima Bridge, | 770m | (1983) |
| Ohnaruto Bridge, | 876m | (1985) |
| Shimotsui–Seto Bridge, | 940m | (1988) |
| Kita–Bisan–Seto Bridge, | 990m | (1988) |
| Minami–Bisan–Seto Bridge | 1.100m | (1988) |

Todos presentan unas formas tradicionales, reflejando la corriente de diseño americana, con torres de acero con refuerzos diagonales y celosías rigidizadas.

Otros problemas técnicos importantes, no primordiales (en general) en América, que tuvieron que ser resueltos en el Akashi Kaikyo Bridge, fueron las amenazas de terremotos y tifones. De hecho, la sacudida del 17 de Enero de 1995 del terremoto Hanshin, en el momento en que las torres y cables habían sido terminados de ejecutar. El deslizamiento de

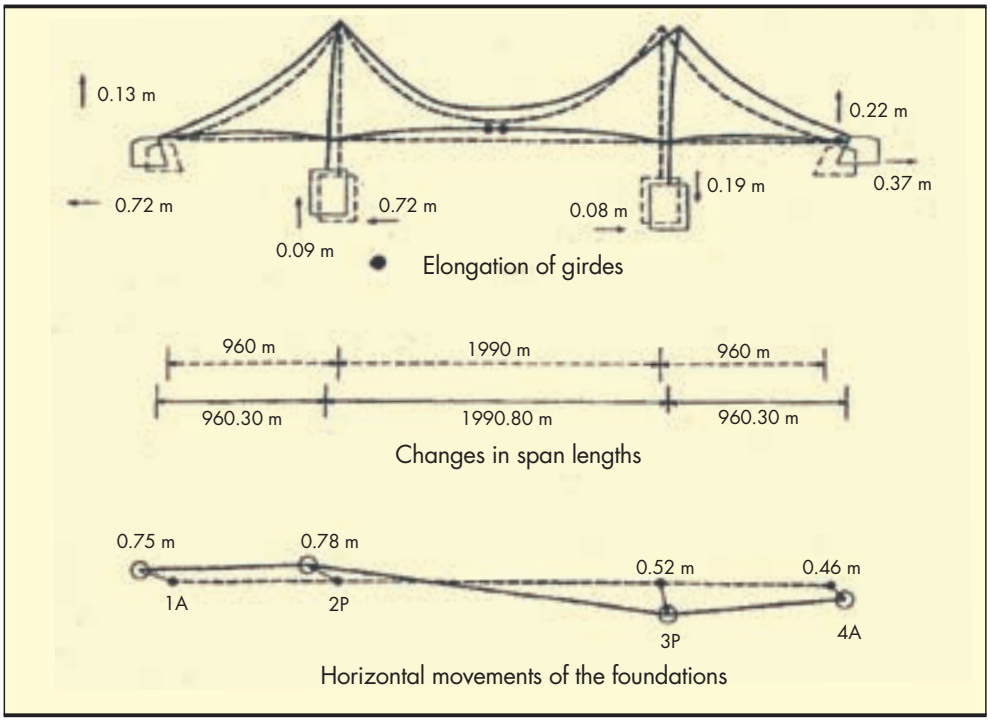
*The difference in these ratios greatly influence the weight of a deck's stiffening. In Storebaelt Bridge, the weight of steel per $m^2$ of deck is 424 $Kg/m^2$ and in the Akashi Kaikyo Bridge, 760 $Kg/m^2$, although it must be borne in mind that an aerodynamic cross section in a closed welded caisson was adopted in the former. Its interior was not painted because it was dry air injection dehumidified (Gimsing 1998). Other Storebaelt Bridge peculiarities differentiating it from earlier suspension bridges included the non use of suspension hangers, which had certainly been adopted in the Severn Bridge, to increase stiffness, as well as the use of concrete towers (254 m) already used previously in the Humber Bridge (156 m high).*

*On it part, the Japanese engineer who had no background in this field, adopted the American experience, undoubtedly the pioneer and most evolved in the world up to the last quarter of the 20th century, as her main source of learning thus building the following bridges before the Akashi Kaikyo Bridge:*

| | | |
|---|---|---|
| *Kannon Bridge,* | *712m* | *(1973)* |
| *Innoshima Bridge,* | *770m* | *(1983)* |
| *Ohnaruto Bridge,* | *876m* | *(1985)* |
| *Shimotsui–Seto Bridge,* | *940m* | *(1988)* |
| *Kita–Bisan–Seto Bridge,* | *990m* | *(1988)* |
| *Minami–Bisan–Seto Bridge* | *1100m* | *(1988)* |

*They all display traditional shapes, reflecting the trend of American design, with steel towers with diagonal reinforcements and stiffened lattices.*

*Other important, non-primordial (in general) technical problems in America, that had to be solved in the Akashi Kaikyo Bridge, were earthquake and typhoon threats. In fact, on 17 January 1995, the Hanshin earthquake occurred at the time when towers and cables had just been concluded. Active fault slides which were feared during the planning phase came true near the bridge's span centre, causing the displacements shown in Figure 11 which may be summa-*




**FIGURA/E 11.** Efectos del terremoto Hanshin (Enero 1995) en el puente Akashi Kaikyo / *Effecs of the Hanshin earthquake (January 1995) on the Akashi Kaikyo Bridge (Source: Kurino 1998).*

fallas activas que atemorizó durante la fase de planificación, se volvió realidad cerca del centro de la luz del puente, causando los desplazamientos que se muestran en la Figura 11 y que se pueden resumir en una elevación del perfil en el centro del vano principal de aproximadamente 1 m y un incremento de longitud de 0,8 m en el vano central y de 0,3 m en uno de los vanos laterales. Los movimientos horizontales de las cimentaciones fueron del orden de 50 a 75 cm. Las torres metálicas presentaron problemas de comportamiento frente al viento, debidos seguramente a la excesiva flexibilidad de las mismas por su gran altura, lo que hizo que los ingenieros pensaran en reducir en fases sucesivas (cuando los cables principales y las cargas muertas fueran aplicadas sobre las torres), instalando mecanismos de amortiguamiento en los apoyos del tablero en las torres, situándolos entre las vigas principales.

## Elección de la tipología estructural del cruce de la Bahía

Consecuencia de todas las experiencias, resultados y recomendaciones anteriores y del perfil esquemático del fondo de la bahía según el eje del trazado de la línea (Figura 12), se adopta la siguiente tipología estructural de las unidades morfológicas en que se ha dividido el cruce y que se han definido anteriormente.

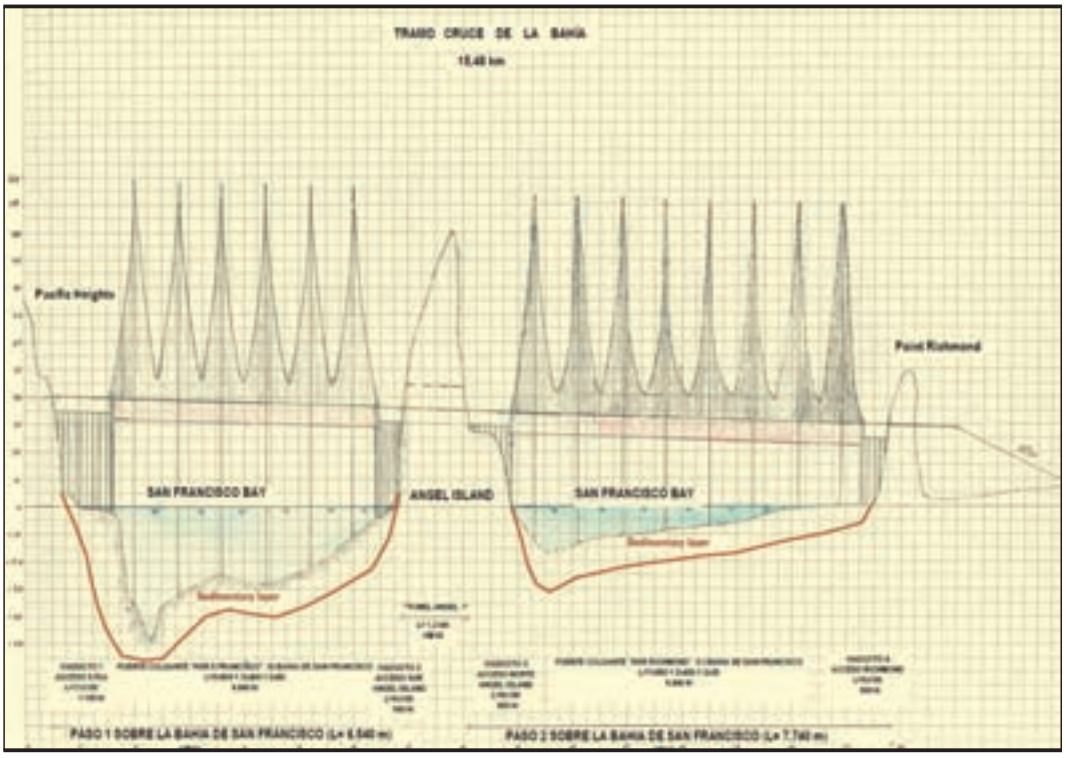
Para los dos pasos sobre la Bahía, de longitudes superiores a los 5 Km y profundidades en algunos puntos mayores de 40 m, resulta obligada la tipología de puentes multivanos con cables atirantados o colgantes. Dada la zona sísmica del emplazamiento, entre las isosismas de grados IX y X de la escala de Rossi–Forel (Figura 13), los más indicados son los segundos, por su mayor capacidad de adaptación a los posibles movimientos de sus cimentaciones. La luz del vano principal debe estar comprendida entre los 700 m y 900 m, para salvar las mayores profundidades de la Bahía, alejar las cimentaciones de la zona de fallas y evitar los mayores

*rized in an approximately 1 m lifting of the profile in the centre of the main arch and an 0.8 m increase in length in the centre arch and of 0.3 m in one of the side spans. The foundations moved horizontally in the order of 50 to 75 cm. The metal towers displayed problems in behavior to the wind, due, certainly, to their excessive flexibility because of their great height which engineers considered reducing in successive phases (when the main cables and dead loads were applied to the towers), by installing shock absorbing mechanisms in the deck supports in the towers, locating them between the main beams.*

## *Choosing the type of structure for the Bay crossing*

*A consequence of all the experiences, results and recommendations discussed and the schematic profile of the bay's bed as per the line's alignment axis (Figure 12) is that the following type of structure of the morphological units into which the crossing has been divided as defined earlier, is adopted.*

*The multi-span bridge type with stayed or suspension cables proves mandatory for the two Bay crossings with a length of over 5 Km and depths at some points of over 40 m. In view of the site's seismic area, between grades IX and X isosismics on the Rossi-Forel scale (Figure 13), the most recommendable are the second because of their greater capacity to adapt to possible movements of their foundations. The main arch's span must be between 700 m and 900 m to overcome the Bay's deeper depths, keep foundations away from fault areas and avoid the greater mud coverings (Tables 2 to 7). The 800 m span, located in the said surroundings, is chosen as it allows for modulation, with 400 m side arches (whether the structural optimum is for these arches in 0.4 or 0.5 of the main one's span is under discussion), of three bridges and four bridges so as, with the access bridge spans, to overcome the two Bay crossings which Angel Island separates.*




**FIGURA/E 12.** Perfil del fondo de la Bahía por el eje del trazado de la línea con espesor de sedimentos / *Bottom bay profile by the axis of the HSRL alignment with mud/sediments thickness.*

**FIGURA/E 13.** Planta Geológica general con líneas isosismas en el Trazado del Proyecto FARWEST / *General Geological ground plan with seismic intensity line on the FARWEST Project.*

recubrimientos de fangos (Cuadros 2 a 7). Se elige la de 800 m, situada en el entorno dicho y que permite una modulación, con vanos laterales de 400 m (en discusión si el óptimo estructural está para estos vanos en 0,4 ó 0,5 de la luz del principal), de tres puentes y cuatro puentes, para con los vanos de acceso, salvar los dos pasos de la Bahía, que separa Angel Island.

Las cimentaciones de las torres y apoyos intermedios podrían ser usadas para instalar turbinas y equipos que aprovechasen el potencial de energía hidrocinética de las corrientes de las aguas de la bahía.

Limitando este aprovechamiento a las cimentaciones de las torres y apoyos intermedios con calado de agua ($y_w$) superior a 6 m e instalando 4 turbinas de última generación comercial (1 MW) por cimentación, se puede llegar a una potencia instalada de 32 MW en el "HSR San Francisco S.B." y de 28 MW en el "HSR Richmond S.B.", es decir 60 MW en el cruce de la Bahía.

*The foundations of the towers and intermediate supports could be used to install turbines and equipment to take advantage of the hydrokinetic power potential of the Bay water's currents.*

*Limiting this exploitation to foundation of the towers and intermediate supports with depth of water ($y_w$) higher ten 6 m and installing 4 turbines of the last commercial generation (1 MW) by foundation, it is possible to arrive till a installed power of 32 MW at the "HSR San Francisco SB" and of 28 MW in the "HSR Richmond SB" Say 60 MW in the cross of the Bay.*

*AREMA (American Railway Engineering and Maintenance –of– way Association), recommends the use of a seismic response coefficient method (Cn) and uniform side loading ("equivalent static lateral force"), applied to metal railway bridge superstructures for large span bridge pre-designing. For the final design in complex cases, seismic forces are generally determined by dynamic, multi-modal struc-*

AREMA (American Railway Engineering and Maintenance –of– way Association), recomienda para prediseño de puentes de gran luz, el uso de un método de coeficiente de respuesta sísmica (Cn) y carga lateral uniforme ("equivalent static lateral force"), aplicada a las superestructuras de puentes metálicos de ferrocarril. Para el diseño definitivo en casos complejos, las fuerzas sísmicas se determinan generalmente por métodos de análisis dinámico multi-modal estructural, y se representan por un espectro sísmico de respuesta de diseño elástico:

- P(x) = Fuerza lateral estática equivalente = Cn W(x).
- Cn = Coeficiente de respuesta sísmica para el modo n de vibración y 5% de amortiguamiento (damping ratio). Cn = (1,2 ASD/Tn2/3) ≤ 2,5 AD.
- W(x) = Peso distribuido de la superestructura.
- A = Aceleración de base determinada a partir de fuentes geológicas apropiadas para el período de retorno del proyecto.
- S = Coeficiente de emplazamiento, entre 1 y 2, dependiendo de las condiciones de cimentación y del suelo.
- D = (1,5/(0,4ξ+1) +0,5) factor de ajuste del amortiguamiento a tener en cuenta para el porcentaje actual de la superestructura de amortiguamiento crítico
- Tn = Período natural del modo n de vibración y es igual a $2\Pi/\omega_n$.
- $\omega_n$ = Frecuencia natural del modo n de vibración

La fuerza lateral estática equivalente se calcula en dos direcciones ortogonales (longitudinal y transversal) para tenerla en cuenta en un análisis lineal elástico, distribuida en los miembros de la superestructura, según las condiciones de apoyo, uniones, hipótesis de carga y rigidez, y a continuación combinarla según las hipótesis de proyecto. AREMA (2008) recomienda el método de la regla 100%-30% para la definición de la fuerza combinada sísmica de diseño EQ

EQ = 1,00 FT + 0,30 FL

EQ = 0,30 FT + 1,00 FL

- FT = Valor absoluto de la fuerza sísmica en la dirección transversal
- FL = Valor absoluto de la fuerza sísmica en la dirección longitudinal

*tural analysis and are represented by an elastic design seismic response spectrum:*

- *P(x)= Equivalent lateral static force = Cn W(x)*
- *Cn= Seismic response coefficient for the n vibration mode and 5% damping ratio. Cn = (1.2 ASD/* $T_n^{2/3}$*) ≤ 2.5 AD*
- *W(x) = Superstructure's distributed weight*
- *A = Basic acceleration determined from geological sources appropriate to the project's return period .*
- *S= Site coefficient, between 1 and 2, depending on the foundation and ground conditions.*
- *D=(1.5/(0.4ξ+1) +0.5) damping ratio adjustment factor to be borne in mind for the actual percentage of the superstructure's critical damping .*
- *Tn = Natural period of the n vibration mode equals* $2\Pi/\omega_n$
- $\omega_n$ *= Natural frequency of the n vibration mode.*

*The equivalent lateral static force is calculated in two orthogonal directions (longitudinal and transversal) to be taken into account in an elastic linear analysis, distributed over the superstructure's members, according to the conditions of support, connections, load hypothesis and stiffness and then to combine it according to the project's hypotheses. AREMA (2008) recommends the 100%-30% rule method for defining the combined seismic design force EQ*

*EQ = 1.00 FT + 0.30 FL*

*EQ = 0.30 FT + 1.00 FL*

- *FT = Absolute value of the seismic force in the transversal direction*
- *FL = Absolute value of the seismic force in the longitudinal direction*

*The response spectrum used to represent the seismic loads of more complex metal superstructures is a graphic representation of the peak response value, in terms of the superstructure's vibration period. They are typically represented for a particular damping factor (5%) and response (deformation, speed or acceleration). AREMA (2008) recommends the use of a standard spectrum response based on the coefficient of seismic response. This is essentially a standard pseudo-acceleration response spectrum for the natural vibration period Tn (Figure 14).*

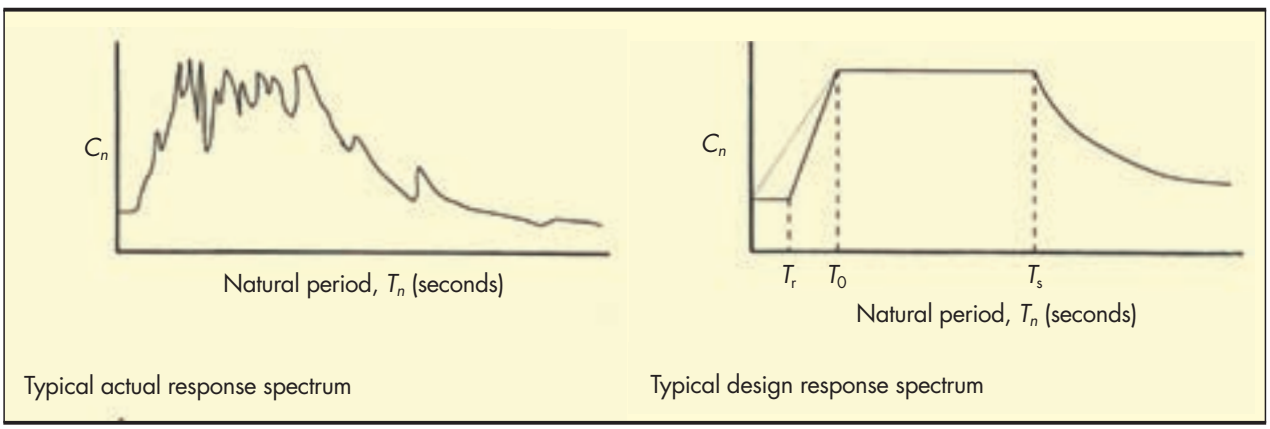



**FIGURA 14.** Espectros de respuesta: real y de proyecto (Source:"Design of modern Steel Railway Bridges" by AREMA).
*Typical desing response spectrum (Source:"Design os modern Steel Railway Bridges" by AREMA).*

El espectro de respuesta usado para representar las cargas sísmicas de superestructuras metálicas más complejas, es una representación gráfica del valor de pico de la respuesta, como una función del período de vibración de la superestructura. Se representan típicamente para un particular factor de amortiguamiento (5%) y respuesta (deformación, velocidad o aceleración). AREMA (2008) recomienda el uso de una respuesta espectral normalizada, basada en el coeficiente de respuesta sísmica. Esta es esencialmente un espectro de respuesta de pseudo-aceleración normalizada por el período natural de vibración Tn (Figura 14).

AREMA recomienda con respecto al espectro de respuesta de proyecto normalizada:

- Tr = Máximo período natural de vibración para respuesta esencialmente rígida.
- T0 = 0,096 S.
- TS = $(0{,}48\ S)^{3/2}$.

Sin embargo, los análisis dinámicos de puentes de ferrocarril normalmente sobreestiman el período natural actual de vibración y, en consecuencia, la respuesta del puente para estructuras de período bajo. AREMA recomienda un espectro de respuesta de proyecto sin respuesta reducida (ó Cn), bajo T0 (Figura 15), a menos que los efectos de flexibilidad de la cimentación, movimiento rotacional de la cimentación y flexibilidad lateral de la luz, se incluyan en el análisis dinámico. En algunos casos, el desarrollo del espectro de respuesta a partir del coeficiente de respuesta sísmica es inapropiado y se requiere la consideración de cargas basadas en el espectro específico del emplazamiento.

El espectro de respuesta debe calcularse, también, en cada dirección ortogonal (longitudinal y transversal) y después combinarse, a efectos de diseño. AREMA, igualmente, recomienda el método de la regla 100%-30% ó el método de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SSRC) $F = \sqrt{Ft^2 + Fl^2}$ ).

De acuerdo con las recomendaciones de AREMA, para los puentes sobre la Bahía, se han tomado los siguientes valores:

- A = 0,162 $\xi < 0{,}05$ D > (1,5/1,02 +0,5)
  $\omega_1 \approx 680/L$(feet) (para vanos en celosía de sección abierta).
- L (side span) = 400 m ≈ 1311 feet
  $\omega_1 \approx 0{,}5$ Tn = 2Π/0,5 ≈ 12,5 sec > T0 D > 1,97.
- S ≈ 1,0 (roca) $T_0 \approx 0{,}1$ sec Ts ≈ 0,33 sec
  T1 → Cn =1,2*0,162*1*1,97/5,4 ≈ 0,07 << 2,5AD ≈ 0,8.
- W(x)= 889 Kg/m² *14,3m = 12.713 Kg/m
  p(x)= 0,8 W(x) ≈ 10,14 T/m.
- Velocidad de cálculo del viento : 110 mph (presión dinámica ≈ 0,11 T/m² → 1,1 T/m (dos vigas celosía h = 8 m).
- Carga por tren en movimiento : 300 lb/ft a 8 ft por encima del carril (0,45 T/m a 2,4 m).

El área de los cables principales se toma de 10.000 cm², análoga a la del Akashi Kaikyo Bridge (1,122 m de diámetro), pese a su menor luz, por haberse diseñado la sección con mayor rigidez por mayores cargas laterales (efecto sísmico y viento, según las recomendaciones citadas de AREMA), y por tanto mayor peso de estructura suspendida 889 Kg/m² (Cuadro 9).

## 2.3. TRAYECTO RICHMOND–SACRAMENTO

A la salida del túnel artificial de Point Richmond (pK 307+580) el trazado pasa (Figura 16), en la zona de Rich-

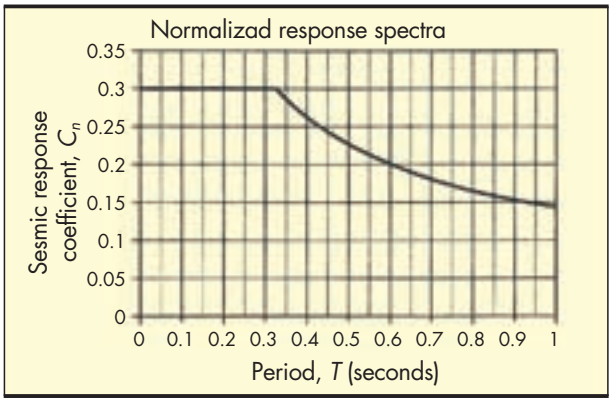



**FIGURA 15.** Espectros de respuesta de proyecto no reducida (Source:"Design of modern Steel Railway Bridges" by AREMA) / *Normalized response spectra (Source:"Design of modern Steel Railway Bridges" by AREMA).*

*With respect to the standard design response spectrum:*

- *Tr = Maximum natural vibration period for an essential rigid response.*
- *T0 = 0.096 S.*
- *TS = $(0.48\ S)^{3/2}$.*

*However, dynamic analyses of railway bridges normally overestimate the current natural vibration period and, consequently, the bridge's response for low period structures. AREMA recommends a design response spectrum without a reduced response (or Cn), low T0 (Figure 15), unless the effects of the foundations' flexibility, rotational movement of the foundations and the span's lateral flexibility are included in the dynamic analysis. In some cases, the development of the response spectra from the seismic response coefficient is inappropriate and consideration of loading based on site-speccific response spectra is required.*

*The response spectrum should be calculated, also, in each orthogonal direction (longitudinal and transversal) and then be combined, to design effects. AREMA likewise recommends the 100%-30% rule method or the method of the square root of the sum of squares (SSRC)* $F = \sqrt{Ft^2 + Fl^2}$ ).

*The following values have been taken for the bridges over the Bay in keeping with AREMA's recommendations:*

- *A = 0.162 $\xi < 0.05$ D > (1.5/1.02 +0.5)*
  *$\omega_1 \approx 680/L$(feet) (for open section latticed arches).*
- *L (side span) = 400 m ≈ 1311 feet.*
  *$\omega_1 \approx 0.5$ Tn = 2Π/0.5 ≈ 12.5 sec > T0 D > 1.97*
- *S ≈ 1.0 (rock) $T_0 \approx 0.1$ sec Ts ≈ 0.33 sec*
  *T1 → Cn =1.2*0.162*1*1.97/5.4 ≈ 0.07 << 2.5AD ≈ 0.8.*
- *W(x) = 889 Kg/m² *14.3 m = 12.713 Kg/m*
  *p(x)= 0.8. W(x) ≈ 10.14 T/m.*
- *Design wind speed : 110 mph (dynamic pressure ≈ 0.11 T/m² → 1.1 T/m (two lattice beams h = 8 m).*
- *Load per moving train: 300 lb/ft at 8 ft above the rail (0.45 T/m at 2.4 m).*

*The main cables' area is taken as 10,000 cm², similar to the Akashi Kaikyo Bridge's (1.122m in diameter), despite its shorter span, through the section having been designed with greater rigidity because of greater lateral loads (seismic effect and wind, according to AREMA's quoted recommendations), and, therefore, greater suspended structure weight 889 Kg/m² (Table 9).*

| ELEMENTO | N | L (m) | Pi (Kg/m) | P(Kg por ml. de tablero) | P(Kg/m² de tablero) |
|---|---|---|---|---|---|
| **VIGAS LONGITUDINALES** | | | | | |
| CORDÓN SUPERIOR | 4 | 8.000 | 603 | 19.296 | 169 |
| CORDÓN INFERIOR | 4 | 8.000 | 603 | 19.296 | 169 |
| MONTANTES | 4 | 6.000 | 371 | 8.904 | 78 |
| DIAGONALES | 8 | 11.314 | 161 | 14.572 | 127 |
| **VIGA TRANSVERSAL SUPERIOR** | | | | | |
| CORDÓN SUPERIOR | 4 | 8.300 | 325 | 10.790 | 94 |
| CORDÓN INFERIOR | 1 | 8.300 | 231 | 1.917 | 17 |
| DIAGONALES | 4 | 3.025 | 176 | 2.130 | 19 |
| **VIGA TRANSVERSAL INFERIOR** | | | | | |
| c/2m | 4 | 8.300 | 325 | 10.790 | 94 |
| **VIGAs HORIZONTALES DE CAJONES** | | | | | |
| SUPERIOR | 8 | 1.800 | 325 | 4.680 | 41 |
| MEDIA | 2 | 1.800 | 231 | 832 | 7 |
| INFERIOR | 8 | 1.800 | 325 | 4.680 | 41 |
| **ARRIOSTRAMIENTO TRANSVERSAL** | | | | | |
| | 4 | 3.222 | 58 | 748 | 7 |
| | 4 | 5.591 | 58 | 1.297 | 11 |
| **ARRIOSTRAMIENTO PLANTA** | | | | | |
| | 2 | 11.581 | 79 | 1.821 | 16 |
| | | | | TOTAL | 889 |

| CABLE PRINCIPAL | $A_{total}$= 10.000 cm² |
|---|---|
| **Peso estructura** | 889 kg/m² x 14,3 m= 12.713 kg/m |
| **Peso cables principales** | 7.850 kg/m x 2= 15.700 kg/m |

NOTA:

La longitud del tablero considerada es de 1.600m

El ancho considerado de tablero es de 14.3 m

**CUADRO TABLE 9.** Medición de elementos estructurales del tablero y cables principales / *Structural elements quantities of the cross section (deck and Brain cables) (Source: Authors).*

**FIGURA/E 16.** Paso por Richmond del Trazado de la Línea HSR "BCA" (Trayecto Richmond–Sacramento) / *Richmond passage of the "BCA" HSRL alignment (Richmond–Sacramento Section).*

mond, bajo la 580 John T Knox Fwy y sigue, en terraplén, paralelo a Castro Street y al anejo parque de vías, hasta alinearse con la Richmond Pkwy por su margen oeste, para atravesar en túnel (TU1 de 6 Km) la zona urbana de San Pablo, llegando a cruzar (una vez sobrepasada la San Pablo Avenue con el viaducto de tramo recto V1) la Bahía de San Pablo mediante un puente colgante de 1,6 Km y sus tramos de acceso (Viaducto V2), situado ligeramente al oeste del Estrecho de Carquínez, en Morrow Cove.

Seguidamente cruza la Hwy 80, para entrar en la HSR Station de Vallejo, cuya ubicación se propone, de forma parcial, sobre una parcela de forma trapecial sin edificar, próxima a la autopista. A continuación pasa en túnel de 13 Km (TU 2) por el extrarradio urbanizado de la ciudad de Vallejo, en la zona de Glen Clove, al noroeste de Benicia (Figura 17). Poco antes de cruzar Lake Herman Road continúa el trazado a cielo abierto, con terraplenes y desmontes de mediana altura, y túneles (TU 01, TU 3 y TU 02) en las proximidades de Fairfield.

En este trayecto (Figura 18) se emplazan los PAETs de Rodeo (Richmond)(≈pK 330), Fairfield (≈pK 370) y Davis (≈pK

## 2.3. RICHMOND–SACRAMENTO ALIGNMENT

*At the exit of the Point Richmond cut and cover tunnel (307+580 Km reference stake), the alignment passes under the 580 John T Knox Fwy (Figure 16), in the area of Richmond, and continues on an embankment parallel to Castro Street and the attached holding siding yard until aligning with the Richmond Pkwy on its west side, to run under the urban area of San Pablo in a tunnel (the 6 Km long TU1), then crossing (after passing San Pablo Avenue with the straight section viaduct V1) San Pablo Bay over a 1.6 Km suspension bridge and its access sections (Viaduct V2), located slightly to the west of the Carquínez Strait in Morrow Cove.*

*It then crosses Hwy 80 and enters the Vallejo HSR Station whose location is partially proposed on a bare trapezoidal shaped plot, close to the freeway. It then passes round the outlying urbanized area of the town of Vallejo in a 13 Km long tunnel (TU 2) in the Glen Clove area to the northwest of Benicia (Figure 17). A little before crossing Lake Herman Road, the alignment continues in the open with embankments and cuttings of a medium height and tunnels (TU 01, TU 3 and TU 02) in the vicinity of Fairfield.*

**FIGURA/E 17.** Paso por Vallejo del Trazado de la Línea HSR "BCA" (Trayecto Richmond–Sacramento) / *Vallejo passage of the "BCA" HSRL alignment (Richmond–Sacramento Section).*

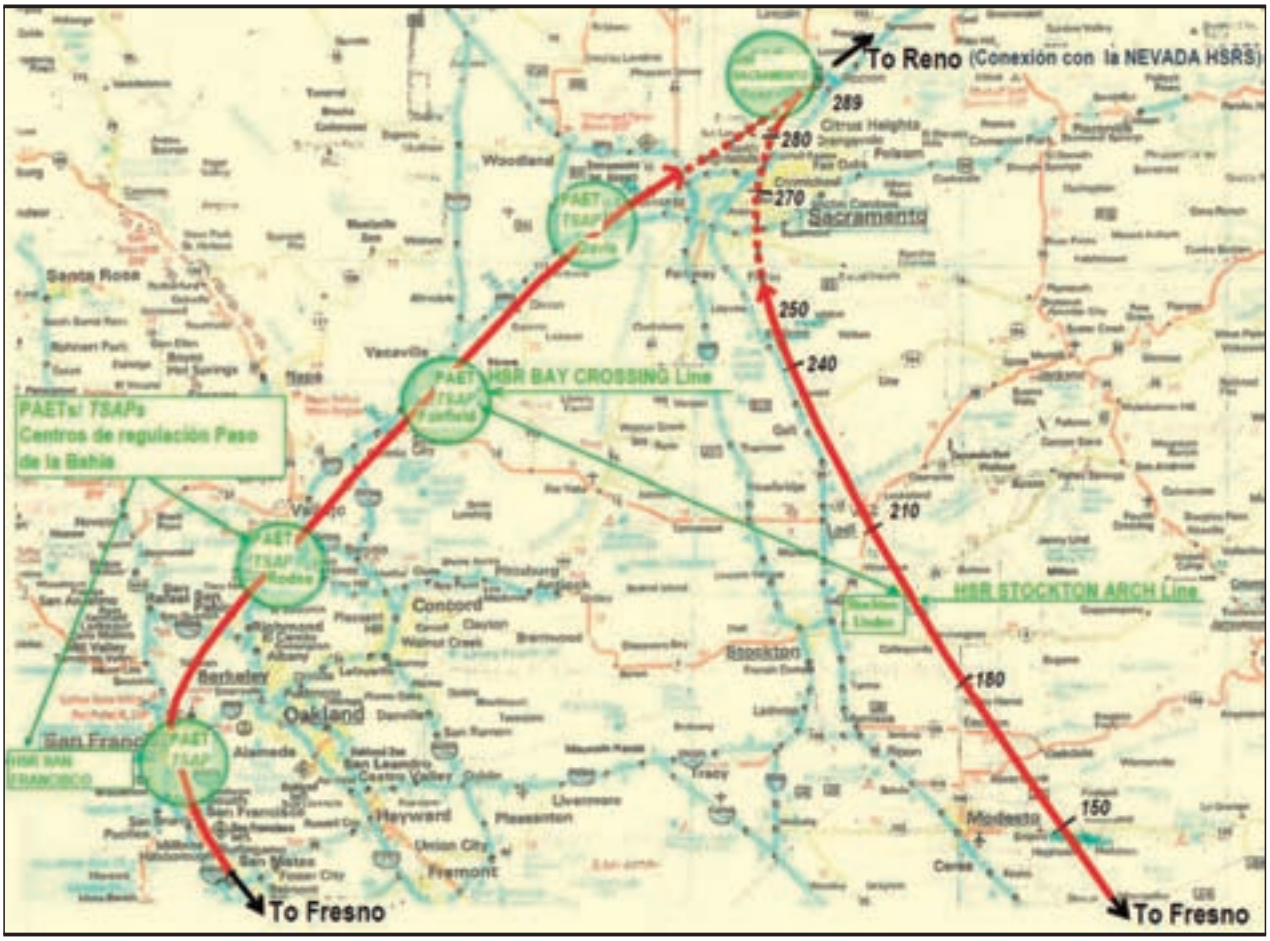



**FIGURA 18.** Localización de PAETs en laHSR "BCA" Line. / *TSAPs location on the "BCA" HSRL.*

410). El PAET de Rodeo de este trayecto, junto con el PAET situado en la estación de San Francisco "Forest Hill" en el trayecto primero antes descrito (San Francisco urbano), se convierten en los centros de explotación del trayecto intermedio San Francisco–Richmond, que regulan desde el punto de vista de seguridad y estrategias de rescate en caso de accidente, el paso de la Bahía en sus viaductos de acceso, puentes colgantes y túneles (lado San Francisco, Angel Island y lado Richmond).

El PAET de Fairfield se comunica con el PAET de Stockton–Linden de la línea Fresno–Sacramento "Stockton Arch Alternative" por la carretera estatal 12, lo que puede contribuir a reforzar las medidas de evacuación en caso de necesidad o de bloqueo en la HSR o túneles de Sacramento.

Al llegar a la zona de West Sacramento, el trazado de la línea "Bay Crossing" pasa sobre el Sacramento River con un viaducto (V3), con arco de tablero intermedio de 200 m de luz, y bajo la Hwy 5, en el túnel urbano de 14 Km de longitud (TU 03), construido con pantallas, y saliendo a cielo abierto después de atravesar North Highlands. A continuación y pasado Antelope, coincide en alineación (traza y rasante) con la línea HSR Fresno–Sacramento "Stockton Arch Alternative" en Roseville, donde se emplaza la gran terminal HSR Sacramento Roseville Station, cabecera de la futura línea HSR interestatal a Reno (Nevada) (Figura 19).

*The Rodeo (Richmond) (≈ 330 Km reference stake), Fairfield (≈ 370 Km reference stake) and Davis (≈ 410 Km reference stake) TSAPs (post of passing and stabling trains) are located on this alignment (Figure 18). The Rodeo TSAP of this alignment together with the TSAP located in the San Francisco "Forest Hill" station on the afore-described first alignment (urban San Francisco) become the operating centers of the intermediate San Francisco–Richmond alignment which, from the point of view of safety and rescue strategies in the case of accident, govern the Bay crossing over its access viaducts, suspension bridges and tunnels (San Francisco side, Angel Island and Richmond side).*

*The Fairfield TSAP connects with the Stockton–Linden TSAP of the Fresno–Sacramento "Stockton Arch Alternative" line via State road 12, which can contribute to reinforcing evacuation measures in the event of necessity or blocking in the HSR or Sacramento tunnels.*

*On arriving at the West Sacramento area, the "Bay Crossing" line's alignment passes over the Sacramento River on a viaduct (V3), with a 200 m span arch with intermediate deck and under Hwy 5, in the 14 Km long urban tunnel (TU 03) built with cut-off walls and coming into the open after crossing North Highlands. Having passed Antelope, it coincides in alignment (route and grade) with the Fresno–Sacramento "Stockton Arch Alternative" HSR line at Roseville, where the grand Sacramento Roseville Station HSR Terminal, the head of the future interstate HSR line to Reno (Nevada) is located (Figure 19).*

**FIGURA/E 19.** Coincidencia de las Líneas HSR "BCA" y HSR "SA" en la Terminal Station Sacramento Roseville / *Coincidence of the "BCA" HSRL and "SA" HSRL at Sacramento Roseville Terminal Station.*

## 3. REFERENCIAS / REFERENCES

1. Lomnitz, C. and Rosemblueth, E. (1976). "Seismik risk and engineering decisions". ISBN 0-4444-41494-0 Elsevier Science Publishers BV. Amsterdam, The Netherlands.
2. Howard, Arthur D. (1979) "Geologic History of Middle California" ISBN 0-520-03874-6 University of California Press. Berkeley, California U.S.A.
3. Poland, C.D. (1980). "Utilization of strong-motion records in buildings design". H.J, Degenkolb & Associates, San Francisco, California, Proceedings of Workshop on interpretation of strong-motion earthquake records, UCLA Report Nº 8015. Los Ángeles. California.USA.
4. Waggoner, P.E. (1990) "Climate Change and U.S. Water Resources" American Association for the Advancement of Science, New YorK, U.S.A.
5. Arrojo, P. y Naredo, J.M. (1997) "La gestión del agua en España y California" Bakeaz Coagret. Vitoria, Spain
6. Díaz del Río, M. (2003) "MOU". *EL PAIS*, 11 de Julio de 2003; *EXPANSION*, 9 de Julio de 2003 y *CINCO DIAS*, 8 de Julio de 2003.
7. Fort, L. (2004) "Safety in High Speed Railway Tunnels" ISBN 84-89456-23-2 2nd Edition (Presented in Praga) Cersa. Madrid, Spain.
8. Stein, Ross S. (2008) "The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Versión 2" California Geological Survey and Southern California Earthquake Center U.S. Geological Survey, Menlo Park. California, U.S.A.
9. Benson, S; Averbuck, A and Balfour, A.C. (2009) "California" ISBN 978-84-08-08289-7 Lonely Planet. Barcelona, Spain.
10. Goicolea, J.Mª. (2009) "Dynamics of High-Speed Railway Bridges". Taylor & Francis Group, London. UK.
11. Fort, C. (2010) "Caracterización geotécnica de base de los suelos de España". DEA ETSICCP Madrid, Spain.
12. Unsworth, J.F. (2010) "Desing of modern steel railway bridges" ISBN 978-1-4200-8217-3 Boca Raton, Florida, U.S.A.
13. Fort, L y Fort, C (2011) "Earth Moving Geoenvironmental workability in California" Geocongress 2012. Oakland, California, U.S.A.
14. Fort, L y Fort, C (2011) "Soil reinforcement vegetation effect. Analysis applied to the earth moving volume of the California High Speed Railway Sistem" International Symposium on Ground Improvement IS-GI 2012. Brussels, Belgium.
15. Tadaki, Kawada (2011) "History of the modern suspension bridges" ASCE press Ed. by Richard Scott, Reston, Virginia. USA.
16. Díaz del Río, M; Fort, L y Fort, C (2011) "Anteproyecto /Preliminary Design LAV Fresno–San Francisco CHSRS Golden Gate Alternative".
17. Pumar, M. (2012) "Sustainability Renewable Energy and Data Engineering" 92th Annual Meeting of the AMS (American Meteorological Society Sumary 2012 New Orleans (USA).

# Sifones regulados para vertido anticipado en avenidas

**TAMARA RAMOS DEL ROSARIO (*), Mª DOLORES CORDERO PAGE (**), VÍCTOR ELVIRO GRACÍA (***) y CRISTÓBAL MATEOS IGUÁCEL (****)**

**RESUMEN** En anteriores trabajos se ha mostrado la posibilidad de regular la descarga de sifones y las ventajas que supone para la evacuación de avenidas en presas existentes que necesiten ampliar su capacidad de evacuación. Esta posibilidad se puede ampliar para que los sifones puedan trabajar antes de que el nivel de embalse alcance el umbral de vertido e incluso lograr reducir el nivel de embalse antes de que llegue la avenida mejorando la laminación.
Esto conlleva sacar del embalse más agua de la que entra comportando ciertos riesgos (esta actuación suele estar limitada en disposiciones legales de muchos países). Por ello se abordan tres cuestiones: Cómo lograr que el sifón actúe con niveles de embalse inferiores a la cota del umbral. Cómo aminorar el riesgo ante un manejo erróneo. Cómo conseguir que esta opción nunca perjudique la gestión normal del embalse.
Se exponen dos consideraciones: Se trata de un sifón con doble cámara; bajo cuyo deflector se inyecta, por una ranura adecuada, un chorro de agua del embalse mediante una bomba que provoca el cebado del sifón al retirar gradualmente el aire de su interior. Una vez cebado el sifón puede cesar la acción de la bomba.
Para aminorar riesgos es conveniente situar una batería de sifones, con una sola bomba para su cebado. Cada sifón constará de dos vasos reguladores uno para funcionamiento ordinario y otro para el extraordinario, y todas estas acciones estarán sometidas a una autoridad que valore la evolución del riesgo.

## REGULATED SIPHONS FOR ADVANCE DISCHARGE IN FLOODS

**ABSTRACT** *Previous studies have shown the possibility to regulate siphons discharge and the benefits for flood evacuation of existing dams which need to expand their discharge capacity. This potential can be expanded to give to siphons the ability to start working before the reservoir level reaches the discharge threshold. And so reduce the reservoir level before flood arrives improving the action exerted by the reservoir in the flood lamination.*
*This possibility means more water has to be removed from the reservoir than water entering in it. This action involves certain risks and tends to be prohibited by laws of many countries. We address three issues here: How to get the siphon action even with reservoir levels below the siphon threshold. How to reduce the risk of incorrect operation. How to get this option to never harm the normal reservoir management.*
*Two considerations are presented: The siphon has dual chamber. Under its deflector it is injected a running water of the reservoir by an appropriate slot that it is mobilized by a pump. This running water causes priming siphon due to the fact that the air inside has been phased out gradually and, after priming, the pump action can be stopped.*
*A battery of siphons should be placed to reduce risks, with one pump for priming. Each siphon is made of two regulators vessels, one for ordinary operating vessels and one for the extraordinary. All of these actions will be subject to physical veto of an authority that values the evolving risk.*

***Palabras clave:*** Aliviaderos, Sifones, Regulados por aire.

***Keywords:*** Weirs, Siphon Spillway, Air-regulated siphon.

(*) Ing. C. C. y P. Investigador del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos CEDEX. E-mail: tamara.ramos@cedex.es
(**) Ing. C. C. y P. Coordinador de Programa Técnico Científico del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos CEDEX. E-mail: dolores.cordero@cedex.es
(***) Ing. C. C. y P. Consejero Técnico del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos CEDEX. E-mail: victor.elviro@cedex.es
(****) Dr. Ing. C. C. y P. Profesor emérito de la Universidad Politécnica de Madrid. E-mail: vereniko@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

En anteriores trabajos [1] a [8] se ha visto la posibilidad de regular y modular la descarga de los sifones y las ventajas que ello puede suponer para la evacuación de avenidas señaladamente en el caso de presas ya construidas que necesiten ampliar su capacidad de evacuación. Aquí se muestra como esta posibilidad se puede ampliar para dar a los órganos de desagüe (si son sifones) la capacidad de empezar a trabajar antes de que el nivel de embalse alcance el umbral de vertido e incluso lograr así reducir el nivel de embalse antes de que llegue la avenida mejorándose de esta forma la acción que ejerce el embalse en la laminación de la avenida.

Ciertamente esta posibilidad, para maximizar su eficacia, presupone que se saque del embalse más agua de la que entra en el mismo. Esta acción, así expresada sin más precisiones, comporta ciertos riesgos y suele por ello estar bien prohibida o bien regulada de forma estricta por las disposiciones legales de muchos países. Por tal razón se abordan aquí tres cuestiones:

A) Como lograr que el sifón actúe incluso con niveles de embalse inferiores al de la cota del umbral del propio sifón.

B) Como conseguir que está opción nunca perjudique la gestión normal del embalse.

C) Como aminorar o eliminar el riesgo de que un manejo erróneo resulte en daños que no sean asumibles.

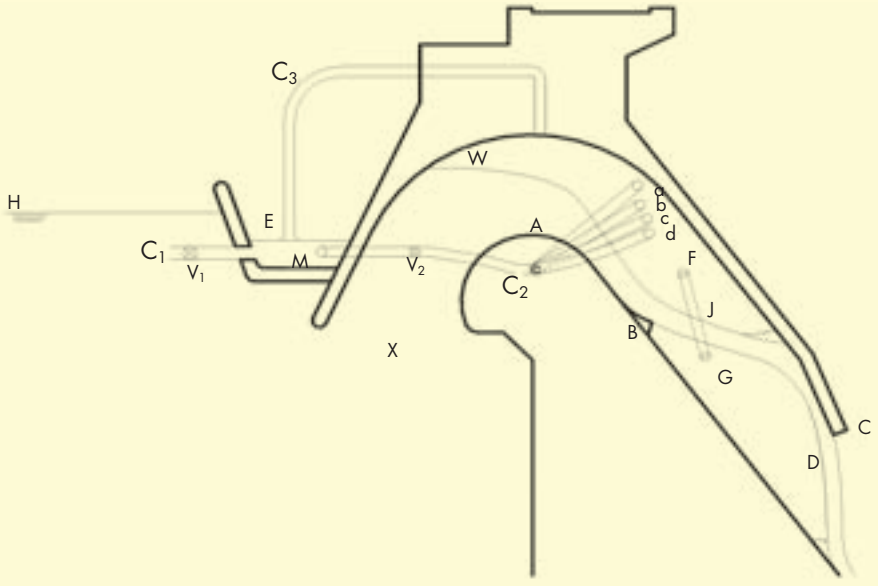
## 2. SIFONES CON LA POSIBILIDAD DE VERTER ANTES DE ALCANZAR EL EMBALSE LA COTA DEL UMBRAL DEL SIFÓN

Las ideas que se exponen a continuación podrían desarrollarse (con las oportunas adaptaciones) para cualquier sifón que sea regulable por medio del control de la admisión de aire en su interior, pero para exponerlas se ha preferido utilizar un sifón como el de las Figuras 1 y 2 cuyo control sea del tipo que se ha denominado control de segundo orden. Pues en principio admite una mayor flexibilidad y sencillez de concepción en sus leyes de evacuación, ver referencias [5] a [7].

En su manejo ordinario el sifón de la Figura 2 para una posición prefijada de sus herramientas de regulación lo que hace es vincular a cada cota de embalse un caudal a evacuar. En efecto, una vez fijados en los valores que se estime adecuados las posiciones de las válvulas $V_1$ y $V_2$ y seleccionada la boca de descarga a, b, c o d, se puede concluir que el comportamiento del sifón será el siguiente: Inicialmente cuando el nivel del embalse supere en el entorno de un decímetro el umbral del sifón el agua que sale de éste arrastra algo de aire, el cual no es repuesto por estar sellada la boca de C3 al igualarse el nivel en el vaso al nivel de embalse. Se genera así un descenso de la presión por debajo de la atmosférica en las cámaras de aire del sifón. Este descenso continuará en tanto permanezca el bloqueo de C3 pero a su vez originará un paulatino incremento del caudal de agua que sale por C2 hasta que éste a su vez supere el que proveniente del embalse entrando en el vaso por C1. Situación, que cuando avance lo suficiente, liberará parcialmente la boca de C3 permitiendo la entrada de aire al sifón y consiguientemente reduciendo la depresión en éste lo que invierte temporalmente el proceso hasta llegar en poco tiempo a un equilibrio.

El equilibrio se alcanzará cuando la liberación de la boca sea la estrictamente necesaria para que el aire por ella aportado por $C_3$ iguale al que el agua arrastra desde el interior del sifón al exterior. Un equilibrio de este tipo se alcanza para cada posible nivel en el embalse. Según se explica con más detalle en las referencias [6], [7] y [8] la ley de desagüe para

**FIGURA 1.** Sifón con regulación de segundo orden.




| | | | |
|---|---|---|---|
| *A* | Umbral del sifón | *J* | Tubo de conexión de cavidades |
| *B* | Deflector de estanqueidad | *M* | Estanque de tranquilización y regulación |
| *C* | Deflector en la salida | $C_1$ | Conducto del estanque de tranquilización |
| *D* | Boca de salida | *W* | Nivel de agua en el sifón |
| *E* | Boca del conducto de descebado | *X* | Boca del sifón |
| *F* | Cavidad | *a,b,c,d* | Salida de conductos de descarga en el sifón |
| *G* | Cavidad | $C_2$, $C_3$ | Conductos de circulación de agua |
| *H* | Nivel de embalse | $V_1$,$V_2$ | Válvulas |

**FIGURA 2.** Esquema de sifón con regulación de Segundo orden.

cada hipótesis de control se puede así obtener de las consideraciones que siguen. Supuesto un nivel de embalse y sabiendo que en el equilibrio correspondiente el nivel del vaso será unos centímetros inferior a la cota de la boca de $C_3$ se puede evaluar el caudal de $C_1$ con una razonable aproximación. Como el equilibrio también requiere que este caudal deba de igualarse con el de $C_2$ la depresión de las cámaras de aire del interior del sifón tiene que ser la estrictamente necesaria para ello y por tanto también es calculable. Como se ha supuesto fijada la cota de embalse y se ha calculado (a partir de ella según se ha visto) la depresión en el sifón, el calculo del caudal saliente es directo. Variando las condiciones de control se obtienen familias de curvas de gasto como las recogidas en la Figura 3.

Para adaptar dicho sifón al nuevo cometido de poder extraer agua incluso cuando el embalse se encuentra por debajo del umbral del sifón son precisas algunas modificaciones como las recogidas en la Figura 4. Tal y como se representa en dicha figura el sifón a emplear es un sifón con doble cámara al que bajo su deflector se le puede inyectar por una ranura adecuada un chorro de agua proveniente del embalse que para ello se moviliza bien por gravedad abriendo una válvula o bien preferiblemente con una bomba, aquí se adoptará esta segunda hipótesis.

Este chorro inferior debe de tener por caudal y velocidad la intensidad suficiente para producir un arrastre de aire en el interior del sifón que, cuando estén bloqueadas las posibles entradas de aire al interior del sifón, generará una depresión que a su vez provocará que en la boca de entrada al sifón ascienda paulatinamente el nivel del agua hasta que en cierto momento vierta por encima del umbral y se inicie el cebado directo del sifón. Una vez cebado el sifón con un caudal suficiente para conseguir que el vertido sobre el umbral provoque por si solo una depresión adecuada, puede (y en cierto sentido debe) cesar la acción de la bomba. Además por supuesto de la citada bomba de impulsión, es preciso, desdoblar el conducto $C_3$ para dotarlo de dos bocas una de ellas, $B_s$, es prácticamente idéntica a la de la Figura 2 pero ahora disponiendo de una válvula, $V_e$, que pueda condenar el flujo por esa boca y en tal caso dejar como operativa solo la nueva boca, $B_i$, que como indica la Figura 4 esta situada sustancialmente más abajo.

La boca profunda no necesita en rigor otra válvula, según se verá, pero si se desea por otras consideraciones puede ponerse para un mayor control. En condiciones ordinarias, es decir cuando no se prevé la necesidad de extraer agua por debajo del umbral del sifón o incluso se considera inconveniente dicha extracción, la válvula $V_e$ debe de estar abierta. Así si se pusiera en marcha la bomba con el embalse por debajo del umbral, como $C_3$ tendría una boca destapada el aire entraría libremente al interior del sifón, y éste sacaría el modesto caudal que puede aportar la bomba por si sola, pero no se provocaría el cebado ni el consiguiente incremento de caudal líquido. Por su parte y en esta misma hipótesis de válvula $V_e$ abierta si sube el nivel la boca $B_i$ estará anegada y no participará en el control de la admisión de aire mientras que la boca $B_s$ estará plenamente operativa y tendrá los mismos efectos y ejercerá el mismo control que se ha señalado arriba al comentar el sifón de la Figura 2.

Por último si estando el embalse algo más bajo que el umbral del sifón se desease que saliese una cantidad importante por el sifón sería preciso realizar dos actuaciones: 1ª) Cerrar la válvula $V_e$ y 2ª) Poner en marcha la bomba hasta que se

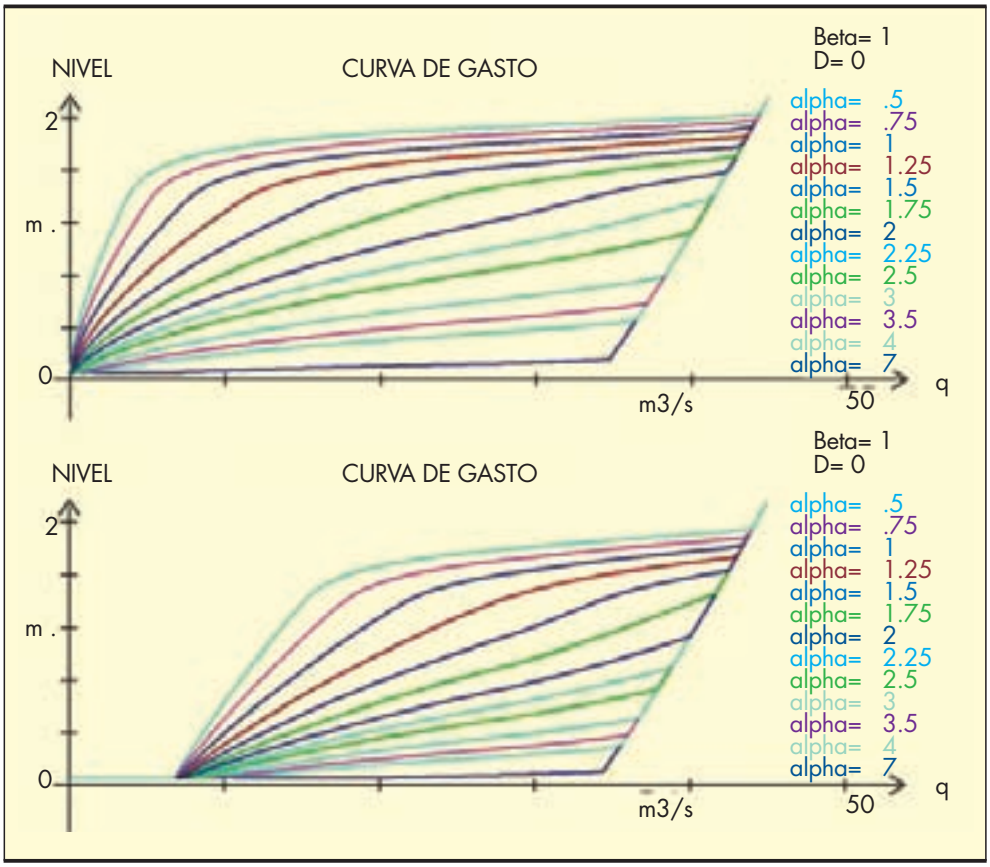
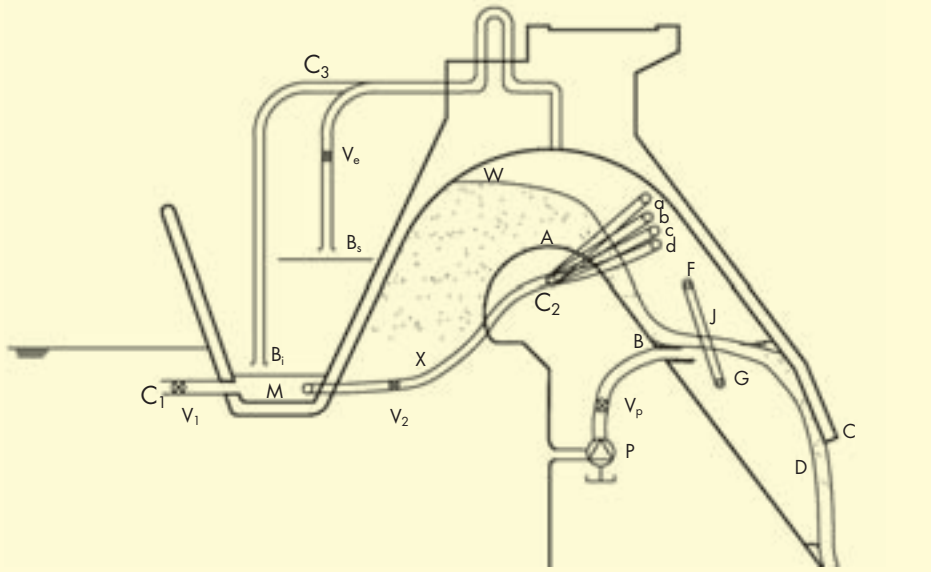



**FIGURA 3.** Curvas de gasto en un sifón regulable.




| | | | |
|---|---|---|---|
| $V_e, V_1, V_2, V_p$ | Válvulas | *J* | Tubo conexión de cavidades |
| *A* | Umbral del sifón | *M* | Estanque de tranquilización y regulación |
| *B* | Deflector de estanqueidad | $C_1$ | Conducto del estanque de tranquilización |
| *C* | Deflector de salida | *W* | Nivel de agua en el sifón |
| *D* | Boca de salida | *X* | Boca del sifón |
| $B_i$ | Boca del conducto de aireación o descebado | *a,b,c,d* | Salidas de descarga en el sifón |
| $B_s$ | Segunda boca de aireación | $C_2$ | Conducto de salida del estanque |
| *F, G* | Cavidades | $C_3$ | Conducto de admisión de aire |
| *H* | *Nivel en el embalse* | *P* | Bomba |

**FIGURA 4.** Esquema de un sifón regulable en funcionamiento.

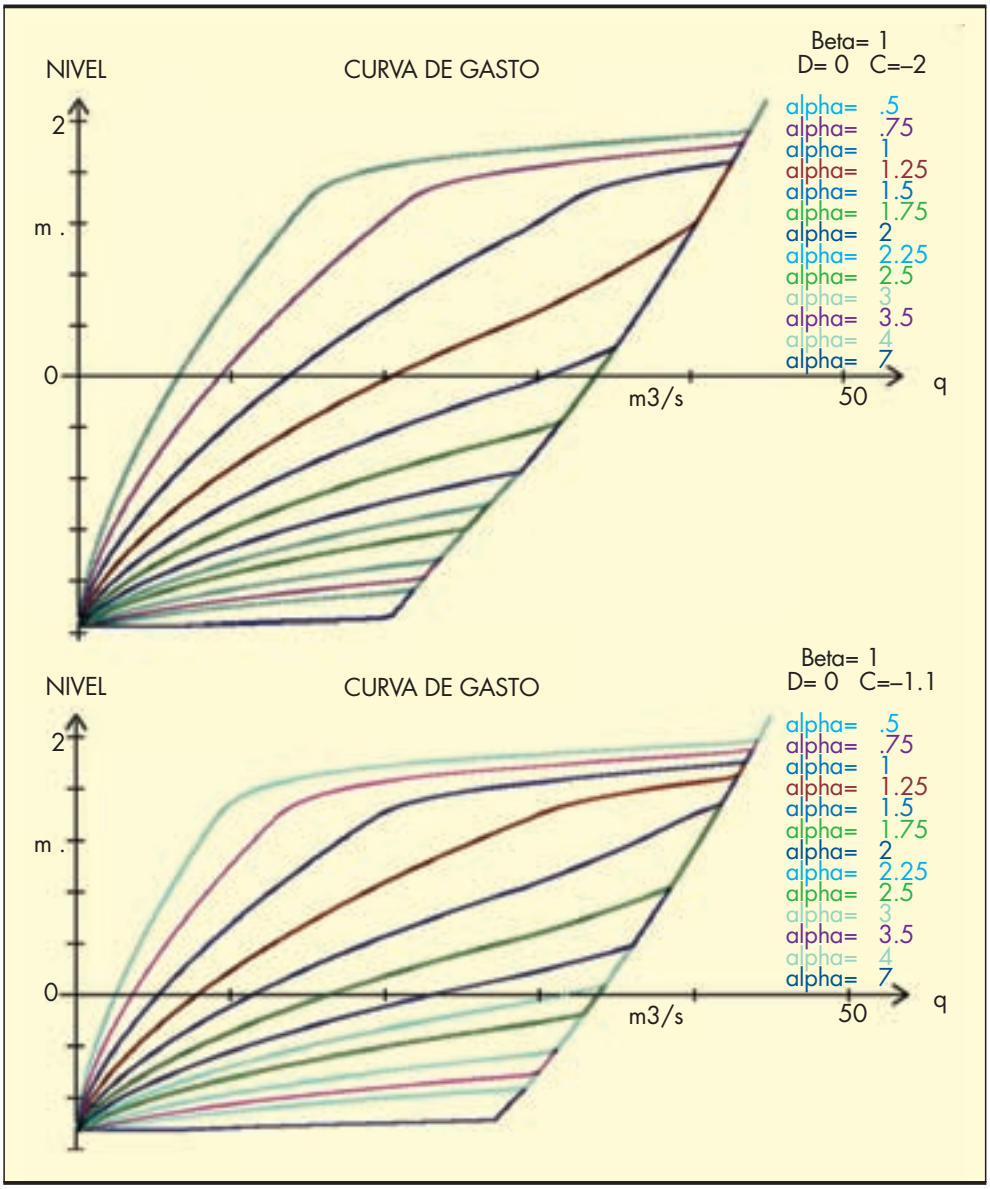



**FIGURA 5.** Curvas de gasto con cebado asegurado.

cebe el sifón. En esta situación el control funciona también por medio de las válvulas de $V_1$ y $V_2$ y la selección entre las bocas de salida a, b, c ó d, seleccionándose en forma similar entre distintas leyes de desagüe. La diferencia está en que ahora en el vaso la boca para entrada de aire que opera es la $B_i$ y ésta está tan profunda y las bocas de salida a, b, c y d, tan altas respecto de ella que para poder extraer agua del vaso hace falta una depresión tan elevada que se consigue el efecto buscado, esto es que el agua del embalse ascienda por la entrada del sifón y vierta por encima de su umbral lo suficiente como para que el cebado del sifón (parcial o total según se haya regulado y haya evolucionado el nivel del embalse) se pueda mantener cuando se pare la bomba.

Una vez parada la bomba la familia de leyes de desagüe puede ser como la recogida en la Figura 5 y su detección teórica puede hacerse con las mismas consideraciones expuestas arriba sobre lo que sucede cuando se alcanza el equilibrio en el vaso con la boca $B_s$ .Para mayores detalles puede consultarse [8] en la Bibliografía.

## 3. NEUTRALIDAD EN LA GESTIÓN NORMAL DEL EMBALSE

La gestión normal del embalse se plantea cuando éste se encuentra en su nivel normal de explotación o precisamente cuando por conveniencias de la gestión se ha desplazado ocasionalmente el nivel de embalse hacia más arriba o más abajo. Se pretende explicar aquí como puede reforzarse la seguridad de que el sifón no vierta (si no se desea así) cuando el embalse se sitúe por debajo del umbral del sifón.

Lo primero que conviene hacer notar es que si la válvula $V_e$ está abierta la boca $B_i$ es como si no existiese pues por ella no podrá entrar aire. En efecto, el mecanismo de regulación ya se ha explicado que lleva a que el nivel en el vaso o bien debe de estar ligeramente por debajo de la boca $B_s$ para permitir la entrada de aire que se ajuste a la demanda (cebado parcial) o bien debe de estar por encima de $B_s$ (cebado completo) y en cualquiera de los dos casos el nivel en el vaso está muy por encima de $B_i$, es decir esta boca está anegada y

por tanto ni permite ni puede permitir entrar aire y por ello no participa en la regulación.

Por lo que hace a la bomba, obviamente si se decide no manejarla nunca, es casi como si no existiera.

Basta pues con que un sifón del tipo de la Figura 4 tenga permanentemente abierta la válvula $V_e$ y se vete el manejo de la bomba de cebado para que la gestión del embalse no difiera en nada de lo que se haría en una instalación con sifones como él de la Figura 2. Con la ventaja de que por supuesto las cosas que sí existen se pueden manejar si es conveniente aunque sea con las precauciones y limitaciones que luego se comentarán.

## 4. PREVENCIÓN FRENTE A MANEJOS ERRÓNEOS

Todo órgano de gestión es por definición susceptible de un manejo erróneo o lo que es peor mal intencionado. Así por ejemplo en muchas presas pueden abrirse compuertas o desagües de fondo en momentos poco apropiados, por lo que previsiblemente el gestor habrá tomado sus medidas de vigilancia y control para disminuir el riesgo de que se produzcan errores, y para que en caso de que se produzcan los perjuicios resultantes sean mínimos.

Naturalmente aquí corresponde hablar de los sifones capaces de sacar agua por debajo del umbral del embalse y nos referiremos a las medidas a adoptar especialmente ligadas a esa circunstancia. Vaya por delante que las medidas que se van a comentar serán más o menos adecuadas según la presa y situación concreta en que se planteen, y por ello deben entenderse como indicativas y no exhaustivas.

Para aminorar o eliminar los citados riesgos se debe partir de recordar que los sifones habitualmente se disponen en baterías con varios de ellos lo que permite además una actuación diferenciada. Algunas de las medidas a considerar son:

- Que solo algunos de los sifones sean susceptibles de funcionar con niveles inferiores a la cota de su umbral.
- Que aun dentro de los que van a funcionar por debajo de su umbral algunos lo puedan hacer a cotas inferiores a los otros.

Estas dos precauciones permiten limitar el caudal máximo que se puede evacuar por debajo del umbral y también:

- Que la bomba de cebado de los sifones sea única y que tenga que cebar sucesivamente a los distintos sifones en que vaya a operar. Así no habrá posibilidad de que un único error ponga en marcha varios sifones.
- La clausura de cada una de las válvulas $V_e$ será desde luego independiente y vendrá enclavada por dos llaves, debiendo pues equivocarse dos personas.
- Que la bomba de cebado disponga de un temporizador que le corte el suministro eléctrico al cabo de un tiempo prudencial desde su arranque (por ejemplo 15 minutos).
- Que el manejo de las válvulas $V_e$ solo se pueda hacer desde la presa pero que si se estima necesario se pueda disponer de un enclavamiento controlado remotamente desde aguas abajo que haga necesaria una autorización externa.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido financiación por el actual Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, en el marco del proyecto “Mejora de la capacidad de desagüe de presas existentes mediante Aliviaderos en Sifón y aliviaderos en Laberinto”, 029/RN08/04.5.

## 6. REFERENCIAS

[1] MATEOS, Cristóbal. “Aliviaderos en sifón”.En 2ª Jornada Técnica sobre Aliviaderos no Convencionales, Ed. SEPREM, Madrid, junio 2005.

[2] MATEOS, Cristóbal, ELVIRO, Víctor, CORDERO, Dolores. “Mejora de la capacidad de desagüe de presas existentes mediante aliviaderos en sifón”. VIII Jornadas Españolas de Presas CNEGP-SPANCOLD, Córdoba, noviembre 2008.

[3] MATEOS, Cristóbal, CORDERO, Dolores. “Aliviaderos con sifones regulados”. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, septiembre 2008.

[4] MATEOS, Cristóbal, CORDERO, Dolores. “Regulatable siphon spillway”. 23rd International Congress on Large Dams, Brasilia, Brazil, mayo 2009.

[5] MATEOS, Cristóbal, CORDERO, Dolores. “Prevention of cavitation in siphons”. 33rd IAHR Congress, Vancouver, Canada, agosto 2009.

[6] MATEOS, Cristóbal, ELVIRO, Víctor, CORDERO, Dolores, RAMOS, Tamara. “The limits of regulation in siphons”. The 78th ICOLD Annual Meeting, Hanoi, Vietnam, mayo 2008.

[7] MATEOS, Cristóbal, ELVIRO, Víctor, CORDERO, Dolores, RAMOS, Tamara. “Regulación de Segundo orden en Sifones”. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, noviembre 2010.

[8] MATEOS, Cristóbal, ELVIRO, Víctor, CORDERO, Dolores, RAMOS, Tamara. “Extension of siphon operation range”. 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia, junio 2011.

# Evaluación de las emisiones de $CO_2$ del tráfico por carretera (herramienta $CO_2$TA)

**LAURA CRESPO GARCÍA (*) y FERNANDO JIMÉNEZ ARROYO (**)**

**RESUMEN** Ahora, después de varios años de investigación para conocer mejor los fundamentos y variables que definen las más modernas herramientas de cálculo de emisiones en las distintas etapas de los proyectos de transporte, se pretende recoger todo lo aprendido en este periodo, plasmándolo en la herramienta de "Evaluación de las emisiones de $CO_2$ del Tráfico por carreterA ($CO_2$TA)" en pauta interurbana. Ésta surge como respuesta al creciente interés de la Administración por comenzar a incluir la variable Cambio Climático en los procesos de toma de decisiones de Políticas, Planes, Programas y Proyectos a evaluar mediante la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) y la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), aunque como ya se verá a lo largo del artículo, se adapta mejor a la Evaluación de Impacto Ambiental. Además, $CO_2$TA tiene el valor añadido de ayudar a introducir conceptos relacionados con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), centrándose de forma concreta en la Huella de Carbono y la Huella Energética.

## ASSESSMENT OF $CO_2$ EMISSIONS FROM ROAD TRAFFIC ($CO_2$ TA)

**ABSTRACT** *After several years of depth research into the knowledge of the basis of different emission calculation tools that study various stages of transportation projects, the Centre for Public Works Studies and Experimentation (CEDEX) intends to collect everything learned in this period in the tool "Assessment of $CO_2$ emissions from road traffic ($CO_2$TA)" on intercity pattern. This is a response to the growing Administration interest of beginning to include the Climate Change issue in decision-making processes of plans, programs and projects policies, which are assessed by Strategic Environmental Assessment (SEA) and Environmental Impact Assessment (EIA). However, as discussed throughout the paper, $CO_2$TA is better suited to EIA. Furthermore, $CO_2$TA represents the added value of helping to introduce concepts related to Life Cycle Assessment (LCA), specifically focusing on the carbon and energy footprint.*

***Palabras clave:*** Evaluación de impacto Ambiental (EIA), Análisis del Ciclo de Vida (ACV), Huella de carbono (HC), Huella Energética, COPERT4.

***Keywords:*** Environmental Impact Assessment (EIA), Life Cycle Analysis (LCA), Carbon footprint, Energy footprint, COPERT4.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos que solicitan las normativas europea y nacional en relación a la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) y la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) vienen configurándose desde hace años como un instrumento imprescindible para incorporar criterios ambientales en los procesos de toma de decisiones. La necesidad de estos instrumentos aparece con la puesta en marcha de normativas de carácter preventivo que se formulan en la Unión Europea (UE). Esto hace que estas técnicas sean herramientas muy eficaces al proporcionar mayor información, con la posibilidad de comparar las diferentes opciones, dando fiabilidad y confianza en la toma de decisiones, y permitiendo elegir entre las diferentes alternativas posibles de una actividad proyectada en base a criterios científicos y técnicos.

De forma paralela a la elaboración de estos instrumentos normativos, se han ido desarrollando otras herramientas ambientales de carácter opcional que también ayudan en los procesos de toma de decisiones, incorporando una perspectiva de análisis de ciclo de vida. Estas herramientas pretenden abarcar todos los impactos ambientales de diferentes actuaciones a lo largo de su vida útil, considerando el concepto de ACV. Estos instrumentos, como la huella energética, cen-

(*) Ingeniero Agrónomo. Jefa de Área de Contaminación Atmosférica y Cambio Climático. Área de Contaminación Atmosférica y Cambio Climático. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA). Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Alfonso XII, 3. 28014 Madrid. E-mail: laura.crespo@cedex.es

(**) Licenciado en Ciencias Ambientales. Profesional libre. E-Mail: fernando.jimenez.arr@gmail.com

trada en el consumo de energía, o la huella de carbono, con su correspondiente reflejo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pueden estimar impactos concretos debidos al consumo de energía y las emisiones de GEI, causa del mayor problema ambiental que sufre el planeta. Las normas ISO 14040 de ACV y 14064 de Gases de efecto Invernadero o el Greenhouse Gas Protocol (GHG protocol) son ejemplos representativos de todo ello.

Siguiendo las metodologías de ayuda en la elección entre varias alternativas en un proceso de toma de decisiones e incluyendo el concepto de ciclo de vida de un producto o servicio, se garantiza que se tienen en cuenta las repercusiones previsibles sobre el medio ambiente a lo largo de la vida útil de una actividad. De aquí la necesidad de desarrollar herramientas o instrumentos que permitan cuantificar los efectos de una actuación concreta, porque sólo lo que se puede medir se puede comparar. Este procedimiento también va a facilitar el seguimiento de las actuaciones, lo que va a permitir cuantificar medidas correctoras que se estimen necesarias, así como valorar las diferentes opciones para mejorar el servicio hasta obtener las más sostenibles, en términos de eficacia y eficiencia.

Hasta el momento, entre los impactos ambientales con presencia significativa en los procesos de toma de decisiones no estaba incluida la variable cambio climático. Sin embargo, en los últimos años, la creciente preocupación por conocer las causas y efectos del calentamiento global ha propiciado que se empiece a analizar y a tener presente por parte de las autoridades ambientales en sus procesos de toma de decisiones, llegandose a incluir este concepto en la nueva Ley 21/2013 de evaluación ambiental de 9 de diciembre 2013.

La lucha contra el cambio climático tiene una doble vertiente, por un lado la *Adaptación* a los efectos producidos por las variaciones en el clima futuro de los diferentes territorios y formas de vida que en ellos se desarrollan, y por otro la *Mitigación* de las emisiones de GEI de origen antrópico, responsables de estos cambios según el consenso científico representado en el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). Hay que señalar que los aspectos ligados a la mitigación tienen en cuenta el uso que se viene dando a los combustibles fósiles en la sociedad más actual, estableciendo una relación directa con el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, sobre todo cuando se habla de transporte. Considerar estos aspectos en la toma de decisiones ayudará a valorar los impactos relacionados con el consumo energético en las diferentes alternativas de desarrollo, teniendo en cuenta un escenario futuro con importantes restricciones en cuanto a la disponibilidad de los recursos energéticos derivadas del agotamiento de los combustibles fósiles.

En el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA) del CEDEX se ha venido dando soporte técnico a diferentes administraciones con responsabilidades en los dos aspectos a considerar de este problema global. No obstante, este artículo va a centrarse en exclusiva en el desarrollo la herramienta de "Evaluación de las emisiones de $CO_2$ del Tráfico por carreterA ($CO_2$TA)", relacionada con la cuantificación de las emisiones, y por tanto con efectos en la mitigación del cambio climático y, por extensión, con los conceptos de incluir el ahorro y la eficiencia energética, ligados al transporte en sus etapas preliminares de diseño, como pieza importante de la toma de decisiones en las legislaciones antes descritas (EAE y EIA), sobre todo la EIA.

Entre todos los sectores que conforman el sistema productivo, el transporte es el que supone mayor peso en el conjunto total de las emisiones de GEI y en el consumo de energía final; siendo el transporte por carretera el modo más intensivo, llegando a acaparar el 25% de las emisiones de GEI y el 30% del consumo de energía final[1] de todo el sistema. Por esta razón el grupo investigador se ha centrado en este sector, desarrollando $CO_2$TA con la intención de ayudar en la comparación de alternativas de transporte por carretera en pauta interurbana, incluyendo además el concepto de ACV, centrado el análisis en la huella de carbono y la huella energética. Además se da el caso de que el transporte está incluido entre los sectores difusos (transporte, residencial, servicios, agricultura y residuos), sectores para los que el Estado español ha asumido un compromiso de reducción de emisiones en el horizonte 2020 de un 10% en relación a los niveles de emisión del año 2005[2].

$CO_2$TA ha contado a lo largo de su proceso de diseño con la colaboración y el respaldo de diferentes Administraciones competentes, agentes y actores implicados en el desarrollo de la infraestructura de transporte por carretera y en el estudio de los impactos producidos a lo largo de su vida útil, como la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural (DGCEMN), del MAGRAMA, con la perspectiva y consideraciones que impone el órgano ambiental; la Dirección General de Carreteras (DGC), del Ministerio de Fomento, imponiendo la óptica como órgano promotor y/o sustantivo y la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) como la administración competente en proponer y potenciar políticas de lucha contra el Cambio Climático.

## 2. ANTECEDENTES

Cuando se analiza diferente bibliografía relacionada con el ACV en el transporte por carretera en pauta interurbana, se llega a la conclusión de que aún falta mucho por andar hasta poder disponer de herramientas contrastadas que completen la cuantificación de emisiones y consumo energético de las diferentes fases y subfases de las que se compone un proyecto de infraestructuras de transporte por carretera a lo largo de su vida útil. Faltan inventarios debidamente construidos que recorran de forma ordenada y sistemática cada una de las fases que integran una obra de infraestructura. Además, cuando se comparan los proyectos de este tipo no se tiene la certeza de que se estén evaluando los mismos conceptos en cada uno de los diferentes estudios. Este hecho se pone en evidencia al comparar los resultados obtenidos en el proyecto CLEAM[3], que apunta que alrededor de un 70% de las emisiones de $CO_2$ se produce la fase de tráfico, con los obtenidos en el proyecto OASIS[4], donde se refiere que el 80% del consumo energético del ciclo de vida de un proyecto de transporte por carretera tiene lugar en la fase de explotación (Figura 1).

Como esquema de trabajo en el futuro se propone la estructura planteada en la Figura 2, que describe las fases de un proyecto de transporte por carretera en pauta interurbana, que puede ser usado como referencia para otras pautas, otros modos de transporte e incluso para cualquier otro tipo de proyecto, por describir fases muy genéricas.

---

[1] Fuente: Sistema Español de Inventario (SEI) y Balances energéticos anuales (IDAE).

[2] Objetivos 20-20-20 de la UE. http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm.

[3] Construcción limpia, eficiente y amigable con el medio ambiente. Tarea 4.4. Herramienta de cálculo y análisis de las emisiones de $CO_2$ producidas por una infraestructura durante su fase de construcción y de explotación. Grupo investigador de la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

[4] Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles. TAREA 6. Optimización de recursos energéticos. Subterea: Determinación de la huella energética en la fase de operación de la autopista. Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT). Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

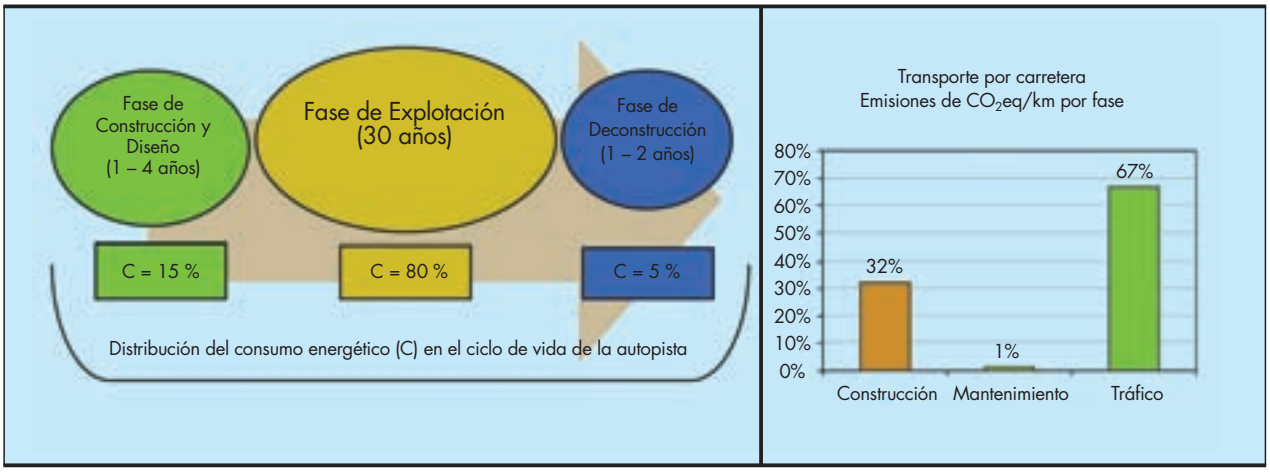



**FIGURA 1.** Ciclo de vida de una Carretera. Fuente: Proyecto OASIS. Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT). Universidad Politécnica de Madrid (Izqd). *Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Proyecto CLEAM. Universidad Complutense de Madrid (Dcha).*

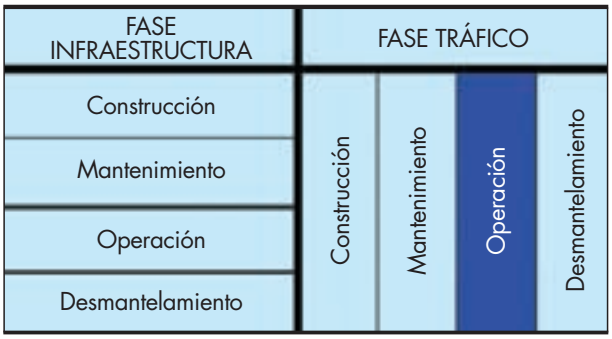



**FIGURA 2.** Esquema de fases del TRANSPORTE POR CARRETERA. *Fuente: Elaboración propia en base al estudio de referencia "Life cycle assessment of railways and rail transports - Application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothnia Line. September 2010". Swedish Environmental Reaserch Institut (IVL).*

Además, otros autores, para referirse al concepto de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), siguen un planteamiento descriptivo del proceso o flujo de energía, con la denominación Well to Wheel (WTW), del pozo a la rueda (Figura 3).

$CO_2$TA se centra en la subfase operación incluida en la fase de tráfico y en el proceso que va del tanque a la rueda (TTW), que es la parte que más atención ha recibido tanto desde los ámbitos de investigación como desde las instituciones europeas. Este esfuerzo está justificado al tratarse de la fracción más importante en cuanto a consumos energéticos y emisiones de $CO_2$ de este tipo de proyectos (fase marcada en la Figura 1).

## 3. METODOLOGÍA

La herramienta $CO_2$TA, construida para la valoración de alternativas de un proyecto de transporte por carretera en pauta interurbana, se ha diseñado teniendo en cuenta las re-

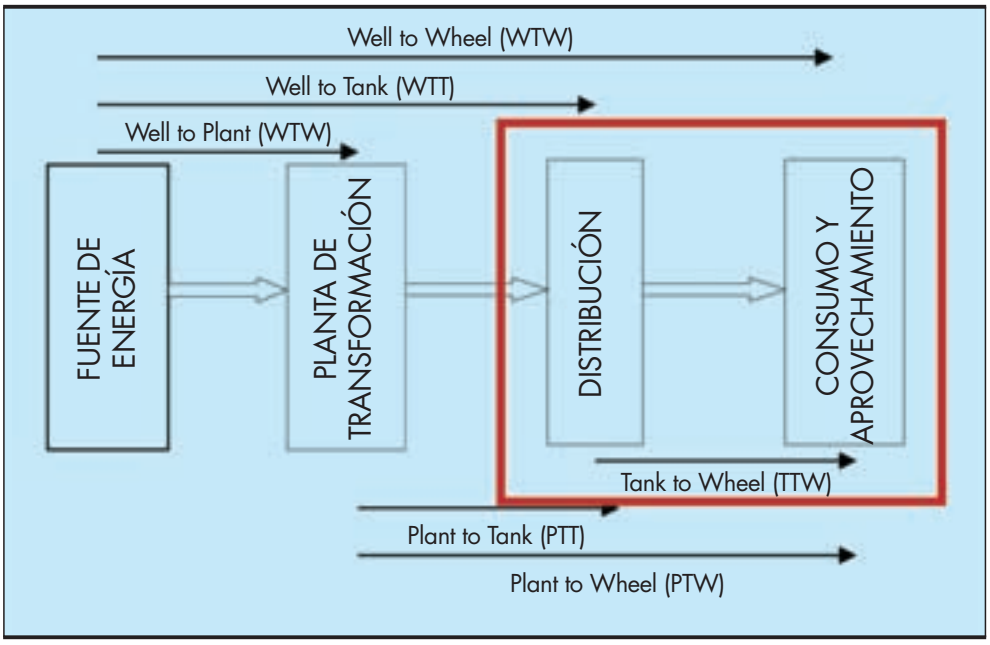



**FIGURA 3.** Esquema general de flujos de energía. *Fuente: Elaboración propia.*

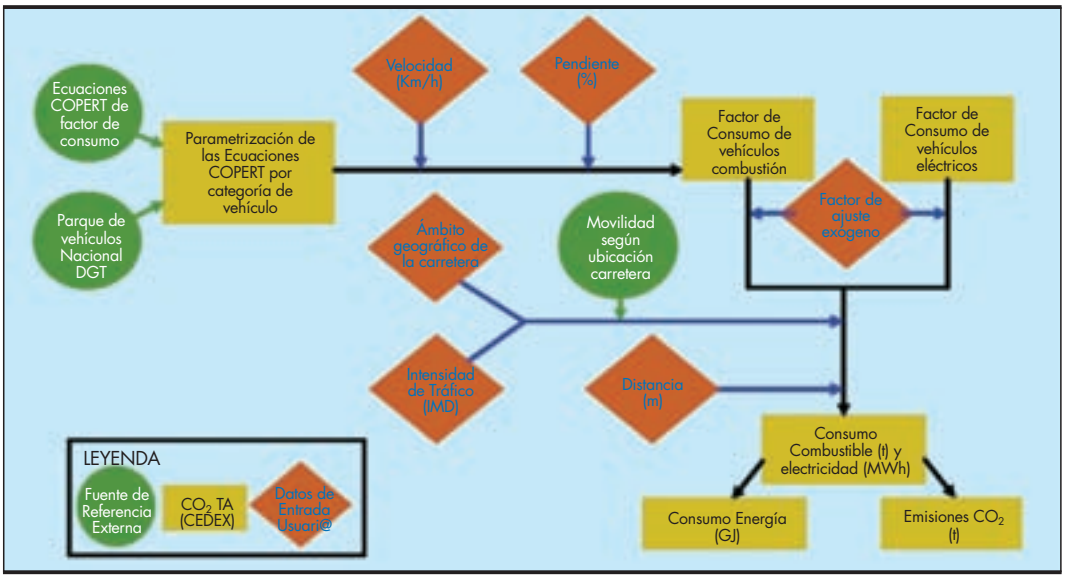



**FIGURA 4.** Esquema de funcionamiento de $CO_2$TA para cada año de referencia y cada alternativa. *Fuente: Elaboración propia.*

ferencias especializadas más actuales para el caso de vehículos de tracción eléctrica y se ha basado en la Guía de Inventario de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera EMEP/EEA[5] 2009, que ha servido de patrón para el diseño de la herramienta *"Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport (COPERT)"* en su versión COPERT4 9.1[6], en el caso de vehículos de combustión interna.

Junto a esta información de base se necesita realizar una serie de suposiciones[7] sobre la evolución del parque y la movilidad con la intención de completar el periodo de vida útil de un proyecto, reparando en años tomados como de referencia para definir dos periodos de prospectiva, que se describen a continuación:

- Periodo 1: Desde el Año 0 del proyecto (a definir por el usuario) hasta el año 2020.
- Periodo 2: Desde el año 2021 al año 2030.

El estudio de las emisiones abarca desde el año 0 o año de puesta en servicio hasta el año 2030, lo que será de especial utilidad en la planificación y evaluación de los proyectos de carretera, al valorar las posibilidades de las diferentes alternativas y permitir la cuantificación de las distintas iniciativas de gestión en un horizonte temporal amplio, ayudando a introducir los conceptos de análisis de ciclo de vida (ACV), huella de carbono y huella energética en los procesos de toma de decisiones.

El horizonte temporal definido hasta 2030 permite tener en cuenta buena parte de la vida útil de una infraestructura de carretera y, al mismo tiempo, proyectar una serie de supuestos más allá del 2020 sin incurrir en excesivos riesgos de pronóstico por lo dilatado del periodo de prospectiva, más cuando en el horizonte temporal próximo se producirá una ruptura tecnológica por la aparición de la movilidad eléctrica.

En la Figura 4 se sintetiza el proceso que sigue la herramienta para estimar el consumo de electricidad, el consumo de combustible, el consumo de energía y las emisiones de $CO_2$ en cada uno de los años marcados como hito o de referencia, para una alternativa concreta de un proyecto de transporte por carretera en pauta interurbana.

Así, para evaluar los consumos y emisiones del tráfico de una alternativa en un proyecto de carretera hasta el año 2030, la herramienta calcula los consumos y emisiones anuales en el año 0 de proyecto, año 2020 y 2030. Una vez obtenidos estos valores, $CO_2$TA calcula los consumos y emisiones en cada periodo Año 0-2020 y 2021-2030 como semisuma de los valores en los años extremos, multiplicado por el número de años del periodo.

### 3.1. CONSUMO ANUAL

Partiendo de la información correspondiente para cada uno de los tipos de vehículos $CO_2$TA (Tabla 1), la herramienta calcula el consumo anual de electricidad o de combustible de cada categoría de vehículo a partir de la siguiente expresión genérica:

$$Ci\ (t/año) = \Sigma FCi\ x\ IMDij\ (veh/día)\ x\ Lj\ (km)\ x\ 365\ días$$

donde:

*Ci* = Consumo anual de electricidad o de combustible de la categoría de vehículo i, expresado en t/año o MWh/año, según el caso.

*FCi* = Factor de consumo de la categoría de vehículo i, expresado en kWh/km o gramos de combustible/km, según el caso.

*IMDi* = Intensidad media diaria de la categoría de vehículo i en la alineación j.

L = Longitud recorrida por el vehículo en la alineación[8] j, en km.

[5] EMEP: Cooperative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollutants in Europe. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009

[6] http://www.emisia.com/copert/

[7] Partiendo las de referencias especializadas en el caso de los vehículos eléctricos y de las ecuaciones de COPERT y de las indicaciones de de la Guía EMEP/EEA en el caso de vehículos de combustión interna.

[8] Por alineación se entiende aquella parte de un tramo que tenga características semejantes de pendiente. Por tramo se entiende aquella parte de una alternativa que tenga las mismas características de velocidad y movilidad. Estos conceptos están definidos en la Figura 12, apartado 4, explotación.

| | |
|---|---|
| **Vehículos ligeros** | Motocicletas |
| | Turismos con motor de combustión interna |
| | Turismos híbridos |
| | Turismos eléctricos |
| | Furgonetas con motor de combustión interna |
| | Furgonetas eléctricas |
| **Vehículos pesados** | Camiones rígidos |
| | Camiones articulados |
| | Autobuses |

**TABLA 1.** Categorías de vehículos considerados por $CO_2$TA. *Fuente: Elaboración propia.*

| Categoría de vehículo | Año 2020 | Año 2030 |
|---|---|---|
| Turismo eléctrico | 0,23 kWh/km | 0,23 kWh/km |
| Furgoneta eléctrica | 0,34 kWh/km | 0,34kWh/km |

**TABLA 2.** Factores de consumo medio para vehículos eléctricos utilizados por la herramienta. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Fuel Economy Guide 2012. Agencia de Protección Ambiental (EPA) y el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos.

### 3.1.1. Factor de consumo de los vehículos eléctricos

La herramienta supone que los factores de consumo medio para turismos y para furgonetas eléctricos en los años 2020 y 2030 van a ser los mismos que en la actualidad. Estos factores se han estimado a partir de *Fuel Economy Guide 2012* publicada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos (Tabla 2).

### 3.1.2. Factor de consumo de los vehículos que emplean combustibles fósiles

Como ya se ha avanzado a lo largo del artículo el cálculo del factor de consumo de los vehículos de tracción con combustibles fósiles se apoya en el programa COPERT4 versión 9.1. Este programa desagrega el parque de vehículos por carretera en 241 categorías, que vienen determinadas por unas características específicas de los vehículos: la antigüedad, el combustible utilizado, y la cilindrada del motor en vehículos ligeros y el peso en vehículos pesados. COPERT asigna una ecuación a cada una de estas 241 categorías de vehículo que permite conocer el factor de consumo de combustible en función de la velocidad de circulación media del vehículo.

Para poder incluir en $CO_2$TA un factor de consumo para cada una de las siete categorías de vehículos que emplean combustibles fósiles (Tabla 1), se ha procedido en primer lugar a identificar cuáles de las 241 categorías del modelo COPERT tienen cabida en cada categoría de vehículos de $CO_2$TA. A partir de estas consideraciones, mediante un proceso de parametrización, se han generado unas fórmulas simplificadas que permiten obtener el factor de consumo en función de la velocidad de cada una de las categorías de vehículos de $CO_2$TA a partir de las ecuaciones empleadas por COPERT.

En este ejercicio, cada ecuación representativa de cada categoría COPERT se pondera en función del número de vehículos del parque nacional que se supone representativo del año 0 de explotación del proyecto, y se procede de forma idéntica para el año 2020 y 2030. Por un lado, las ecuaciones correspondientes al Año 0 se han estimado a partir de los datos del parque en el año 2011 facilitados por la Subdirección de Análisis y Vigilancia Estadística de la Dirección General de Tráfico (DGT). Por otro lado, en el caso de los años de referencia 2020 y 2030, las proyecciones diseñadas para el parque de vehículos futuro se estiman teniendo en cuenta la tasa de reposición de vehículos (matriculaciones) y las tasas de achatarramiento o desguace (bajas) que se han venido produciendo hasta el momento en el parque oficial registrado en la DGT entre los años 2005 y 2011 y que se ha asimilado a las diferentes tipologías descritas y trabajadas por COPERT, estableciéndose una serie de pautas de comportamiento por tipo de vehículo que se describen en la Tabla 3.

| | Periodo Año 0-2020 (Periodo Crisis 2008-2011) | Periodo 2021-2030 (Periodo Medio 2005-2011) |
|---|---|---|
| **Motocicletas** | Matriculaciones **8 veces superiores** a las bajas. | Matriculaciones **se compensan** con las bajas |
| **Turismos Gasolina** | Matriculaciones **se compensan** con las bajas | Matriculaciones **se compensan** con las bajas |
| **Turismos Gasóleo** | Matriculaciones **3 veces superiores** a las Bajas. | Matriculaciones **se compensan** con las bajas |
| **Furgonetas Gasolina** | Matriculaciones **son la mitad** que las Bajas. | Matriculaciones **son la mitad** que las Bajas. |
| **Furgonetas Gasóleo** | Matriculaciones **se compensan** con las Bajas. | Matriculaciones **son el doble** que las Bajas. |
| **Camiones Rígidos Gasolina** | Matriculaciones **son la mitad** que las Bajas. | Matriculaciones **se compensan** con las bajas |
| **Camiones Rígidos Gasóleo** | Matriculaciones **son la mitad** que las Bajas. | Matriculaciones **se compensan** con las bajas |
| **Camiones Articulados** | Matriculaciones **son la mitad** que las Bajas. | Matriculaciones **se compensan** con las bajas |
| **Autobuses** | Matriculaciones **0,5 veces superior** a las Bajas. | Matriculaciones **se compensan** con las bajas |

**TABLA 3.** Pautas de comportamiento por tipo de vehículo en períodos de estudio. *Fuente: Elaboración propia.*

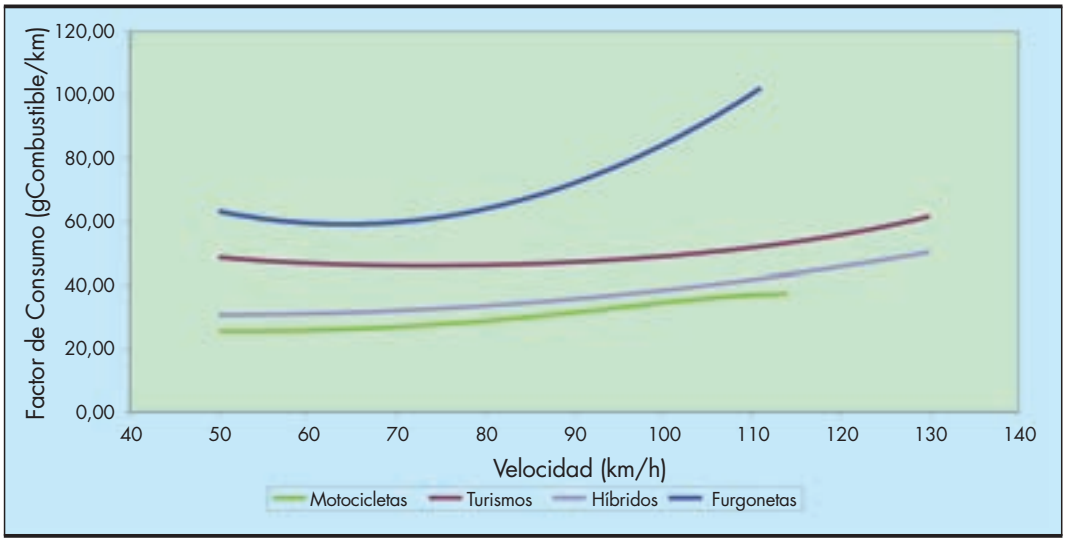



**FIGURA 5.** Factor de consumo de cada categoría de vehículo ligero en función de la velocidad – Año 2020. *Fuente: Elaboración Propia.*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Motocicletas** | **FC(gcomb/km)=(Alpha*Speed^5)+(Beta*Speed^4)+(Gamma*Speed^3)+(Delta*Speed^2)+(Epsilon*Speed)+Zita)*(1-RF)** | | | | | | | | |
| | Alpha | Beta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Ita | Thita | RF |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | -3,61 | 80,78 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Turismos** | **FC(gcomb/km)= (Alpha+Gamma*Speed+Epsilon*Speed^2+Zita/Speed)/(1+Beta*Speed+Delta*Speed^2))*(1-RF)** | | | | | | | | |
| | Alpha | Beta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Ita | Thita | RF |
| | 169,04 | 0,10 | 1,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Turismos híbridos** | **FC(gcomb/km)= (Alpha+Gamma*Speed+Epsilon*Speed^2+Zita/Speed)/(1+Beta*Speed+Delta*Speed^2))*(1-RF)** | | | | | | | | |
| | Alpha | Beta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Ita | Thita | RF |
| | 38,00 | 0,00 | -0,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Furgonetas** | **FC(gcomb/km)=((Alpha*Speed^2)+(Beta*Speed)+Gamma+(Delta*Log(Speed))+ (Epsilon*Exp(Zita*Speed))+(Ita*(Speed^Thita)))*(1-RF)** | | | | | | | | |
| | Alpha | Beta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Ita | Thita | RF |
| | 0,02 | -2,55 | 140,87 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

**TABLA 4.** Ecuaciones $CO_2$TA de vehículos ligeros Año 2020. *Fuente: Elaboración propia.*

Como ejemplo ilustrativo de los resultados obtenidos, en las Figuras 5 y 6 se muestran las curvas de factor de consumo de combustible en función de las velocidades obtenidas para el Año 2020 para cada categoría de vehículo con motor de combustión interna, resultado de esta parametrización. Es importante señalar que se ha realizado este ejercicio suponiendo que la velocidad de los vehículos es siempre superior a 50 km/h, al considerar que en pauta interurbana es difícil encontrar carreteras con velocidades medias de circulación por debajo de este valor.

En las Tablas 4 y 5 se muestran las ecuaciones asociadas a cada una de estas curvas. En este punto se puede destacar que, en la práctica, aunque $CO_2$TA utiliza curvas diferenciadas para estimar el factor de consumo para cada año de referencia distinto, las hipótesis realizadas en los cambios de composición en el parque de vehículos inciden de manera limitada en la determinación de tales curvas.

En el proceso de elaboración de $CO_2$TA se ha observado que los datos referidos al parque de camiones articulados que provienen de la fuente utilizada en la herramienta $CO_2$TA, la Subdirección de Análisis y Vigilancia Estadística de la DGT, no se corresponden exactamente con la categoría camiones con remolque del Mapa de Tráfico de donde se obtiene los datos de movilidad.

Por lo tanto sería necesario realizar una nueva consulta para obtener un parque de vehículos pesados de transporte de mercancías más ajustado a la realidad, a partir del cual se tendría que realizar una nueva parametrización de las fórmulas COPERT4 para obtener las correspondientes ecuaciones $CO_2$TA, con nuevas proyecciones del parque para el año 2020 y 2030 para este tipo de vehículos.

Es probable que el parque de vehículos pesados de transporte de mercancías que se obtenga con este nuevo tratamiento de la información, a utilizar tanto en la parametriza-

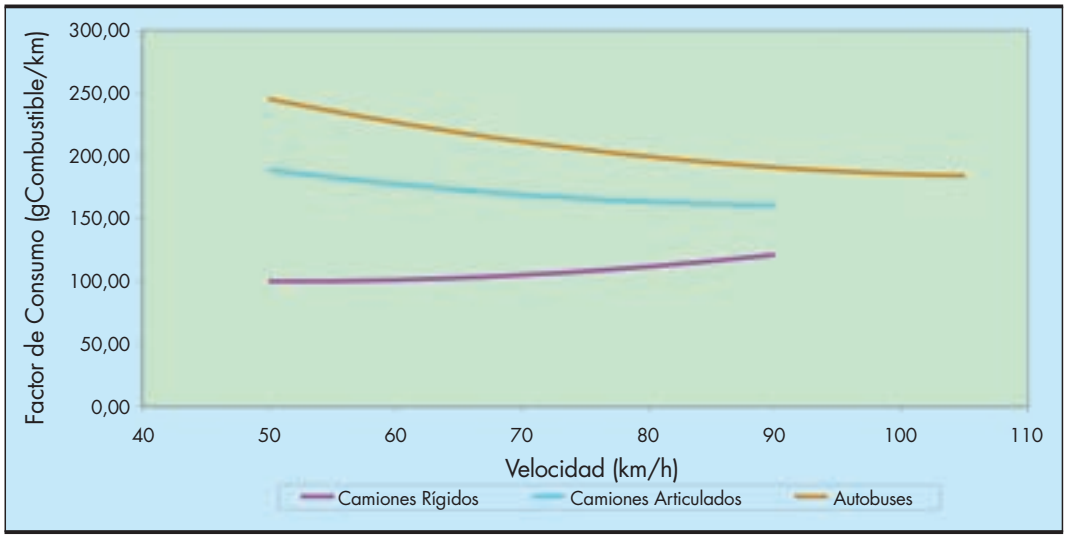



**FIGURA 6.** Factor de consumo de cada categoría de vehículo pesado en función de la velocidad – Año 2020. *Fuente: Elaboración Propia.*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Camiones Rígidos** | **FC(gcomb/km)=(Alpha*Speed^2)-(Beta*Speed)+Gamma** | | | | | | | | |
| | Alpha | Beta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Ita | Thita | RF |
| | 0,01 | 1,41 | 135,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Camiones Articulados** | **FC(gcomb/km)=(Alpha*Speed^2)-(Beta*Speed)+Gamma** | | | | | | | | |
| | Alpha | Beta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Ita | Thita | RF |
| | 0,01 | 2,71 | 288,58 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Autobuses** | **FC(gcomb/km)=(Alpha*Speed^2)-(Beta*Speed)+Gamma** | | | | | | | | |
| | Alpha | Beta | Gamma | Delta | Epsilon | Zita | Ita | Thita | RF |
| | 0,02 | 3,72 | 389,56 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

**TABLA 5.** Ecuaciones $CO_2$TA de vehículos pesados Año 2020. *Fuente: Elaboración Propia.*

ción de ecuaciones como en las proyecciones para una nueva versión de la herramienta, no tenga un efecto muy significativo en los nuevos resultados. A pesar de todo sería necesario un ajuste de la herramienta introduciendo estas mejoras para, en primer lugar asegurar que esta suposición es cierta, y segundo, para aproximar aún más el funcionamiento de $CO_2$TA a la realidad.

Este desajuste se ha producido por las dificultades existentes a la hora de relacionar las diferentes tipologías de vehículos de transporte de mercancías por carretera (marcadas por las definiciones recogidas en las legislaciones) en las diferentes fuentes consultadas. Por esta razón, y siempre partiendo desde la perspectiva que ofrece la estimación o el cálculo de consumo de energía y emisiones de $CO_2$, sería necesario que cada una de las fuentes involucradas (organismos competentes en sus respectivas materias) en el estudio del transporte de mercancías por carretera añadiera, dentro del ámbito de competencia, las variables que fueran pertinentes para poder relacionar el parque de vehículos pesados de transporte de mercancías y la movilidad asociada a este parque, con la metodología COPERT4, que es la fuente de referencia más utilizada a nivel Europeo a la hora de calcular las emisiones de transporte por carretera, y por tanto de $CO_2$. Para la mayoría de los agentes involucrados, la metodología COPERT4 no tiene la fuerza suficiente como para marcar maneras de proceder para trabajar la información. Sin embargo, para explotar mejor esta metodología resulta necesario reducir las tipologías de los vehículos al mínimo de las categorías que se consideren representativas del parque y referir a ellas el resto de las variables que se están manejando: número de vehículos, antigüedad de los mismos, movilidad que desarrollan, peso, longitud y curvas COPERT4 representativas del cálculo de las emisiones y del consumo de la energía. Esta manera de proceder ya ha sido pensada con anterioridad en otros proyectos como el *"Modelo Español de Tarificación de cArreteras (META)"* y *"Calculation system for traffic exhaust emissions and energy consumption in Finland (LIPASTO)"*.

La denominación de cada uno de estos tipos de vehículos tendría que referirse al mismo concepto en todas las fuentes de datos necesarias para alimentar cualquier herramienta que tenga como objetivo el cálculo de emisiones de $CO_2$ o consumo energético.

### 3.1.3. Factor de corrección del factor de consumo de combustible según la pendiente de la carretera

Los factores de consumo de combustible indicados en 3.1.1 y 3.1.2 se refieren a condiciones de circulación sin pendiente en el trazado. La herramienta de cálculo $CO_2$TA no incorpora ningún factor de corrección por efecto de la pendiente de la carretera para el caso de motocicletas y vehículos eléctricos, pero sí para el resto de categorías de vehículos.

#### *3.1.3.1. Factor de corrección por pendiente en turismos y furgonetas con motor de combustión interna*

El programa COPERT4 no incluye la influencia de la pendiente en el caso de vehículos ligeros, a pesar de que existe esta referencia en el proyecto MEET, proyecto que sirvió de base para la elaboración de COPERT. Para solventar la limitación que presentan las ecuaciones de los turismos y furgonetas, la herramienta aplica el factor de corrección proporcionado por la siguiente ecuación obtenida en el marco del proyecto OASIS:

*Factor de corrección debido a la pendiente =*
*0,1437 x Pendiente (en % y con signo) + 0,9995*

Al tratarse de una función lineal, significa, en la práctica, que los aumentos de consumo por efecto de la pendiente del tráfico de este tipo de vehículos se compensan con los ahorros obtenidos por el tráfico de estos mismos vehículos que circula en sentido contrario. Esto sucede porque $CO_2$TA considera un reparto de la intensidad de tráfico del 50% por sentido de circulación.

#### *3.1.3.2. Factor de corrección por pendiente de vehículos pesados*

En el caso de vehículos pesados, se ha analizado cuál es la variación del factor del consumo obtenido para cada categoría de vehículo (camión rígido, camión articulado y autobús), en función de la pendiente y la velocidad. A partir de las ecuaciones que aporta la Guía EMEP/EEA en relación a los factores de consumo de vehículos pesados en función de la pendiente, y siguiendo la misma metodología que se ha expuesto en el apartado 3.1.2, se han parametrizado ecuaciones correspondientes a las categorías de vehículos pesados $CO_2$TA para cada una de las categorías de pendientes distintas de 0% que se reflejan en la Guía y en COPERT (-6%, -4%, -2%, 2%, 4% y 6%). Mediante un ajuste matemático se ha relacionado la curva de consumo parametrizada de "pendiente 0%" con las curvas parametrizadas de factor de consumo en función de la velocidad de pendientes distintas de 0%. Se obtiene una ecuación continua que permite conocer el factor de corrección por pendiente respecto al consumo de combustible con pendiente 0% (Figuras 7 a 9). Este análisis se hace de igual modo para cada uno de los años referencia (Año 0, 2020 y 2030), parametrizando las ecuaciones de categorías de pesados COPERT en ecuaciones $CO_2$TA en función de la pendiente.

Como sucede en el caso de las curvas parametrizados que determinan el factor de consumo en función de la velocidad expuestas en el apartado 3.1.2 las nuevas condiciones que inciden en la composición del parque afectan de manera muy limitada en la determinación de las curvas para estimar el factor de corrección por pendiente para cada año de referencia.

Las ecuaciones que se exponen en las Figuras 7, 8 y 9 se refieren a factores de corrección por pendiente aplicables a todas las velocidades. Las desviaciones que se producen entre COPERT y las curvas obtenidas son significativas, debido a que existe una variación importante entre los factores de corrección en función de la pendiente de las diferentes categorías de vehículos COPERT a diferentes velocidades. Esta opción podría mejorarse siguiendo el esquema planteado en la presentación *"Influence of Road Gradient on Emission Factors (CISMA). 21st TFEIP meeting"*, ajustando las ecuaciones COPERT de factor de consumo de combustible en función de la pendiente para cada categoría $CO_2$TA de vehículo pesados a una función continua interpolada en tres dimensiones del tipo que se representa en la Figura 10, utilizada a modo de ejemplo para ilustrar lo que se entiende que podría representar una mejor aproximación.

### 3.1.4. Factor de ajuste exógeno del factor de consumo

Por último, $CO_2$TA corrige los factores de consumo de cada categoría de vehículo estimados según se describe en los apartados 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 aplicando un factor de ajuste a definir por el usuario para cada grupo de vehículos (ligeros/pesados) y año de referencia del análisis (Año 0, 2020 y 2030) y que permitirá en el futuro incluir ciertas correcciones avaladas en distintos documentos de investigación.

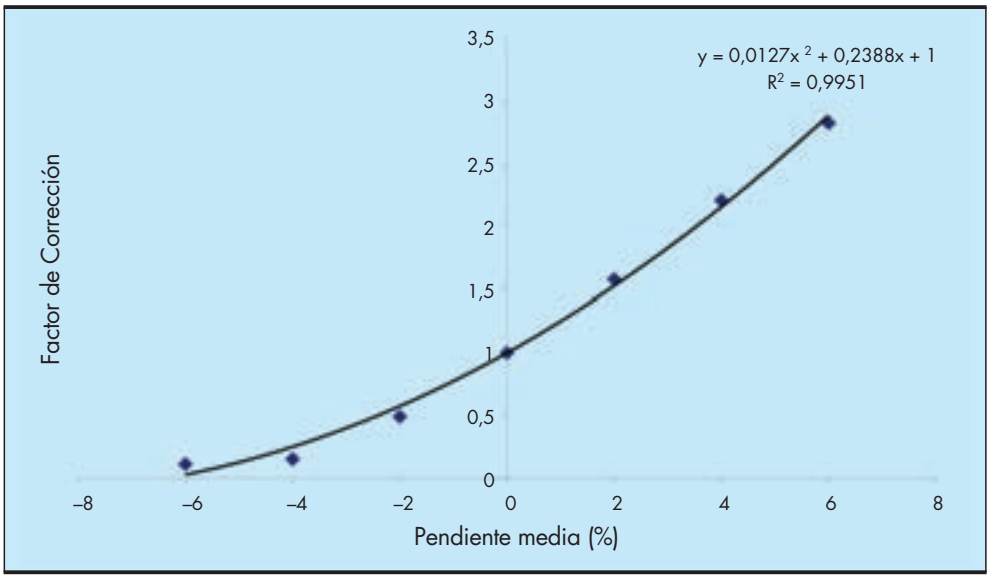



**FIGURA 7.** Factor de corrección por pendiente para camiones rígidos Año 0. *Fuente: Elaboración propia.*

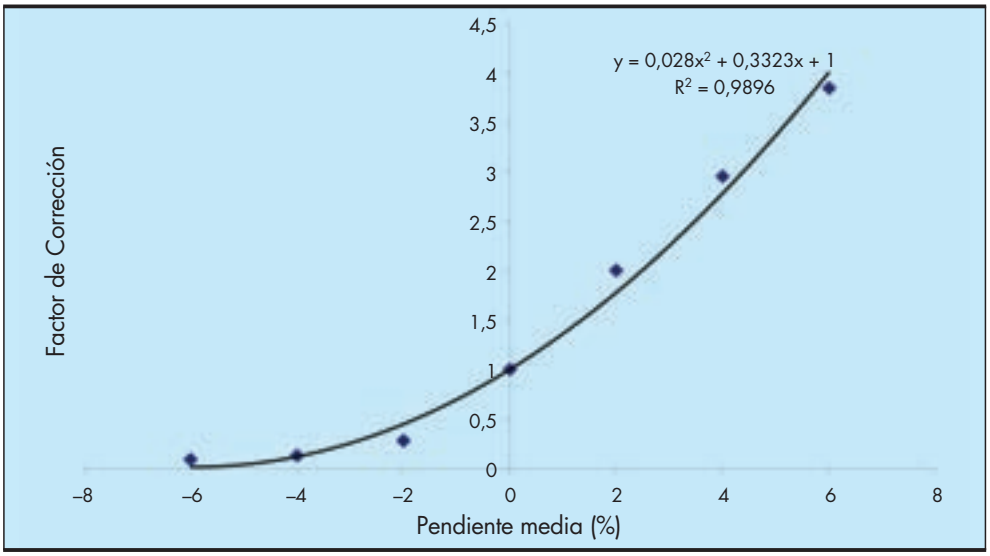



**FIGURA 8.** Factor de corrección por pendiente para camiones articulados Año 0. *Fuente: Elaboración propia.*

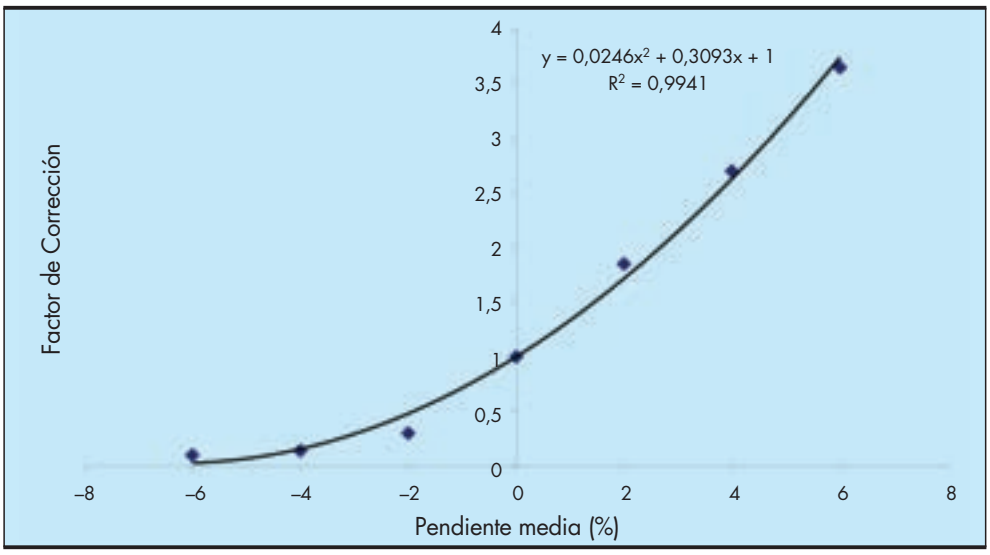



**FIGURA 9.** Factor de corrección por pendiente para autobuses Año 0. *Fuente: Elaboración propia.*

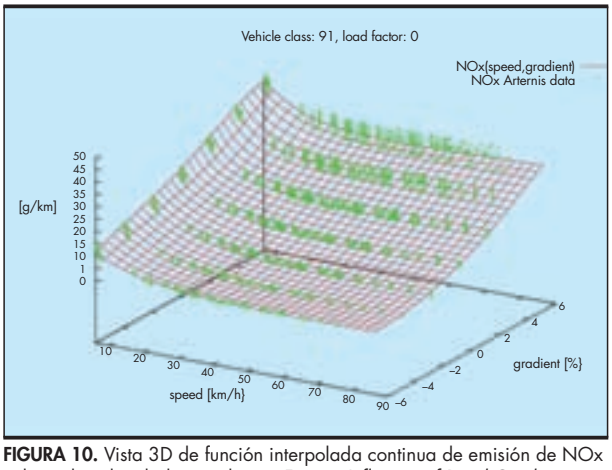



**FIGURA 10.** Vista 3D de función interpolada continua de emisión de NOx valorando velocidad y pendiente. *Fuente: Influence of Road Gradient on Emission Factors (CISMA). 21st Task Force on Emission Inventories and Projections (TFEIP) meeting.*

## 3.2. EMISIONES ANUALES DE $CO_2$

La estimación de las emisiones anuales de $CO_2$ generadas por los vehículos que se desplazan por una carretera en pauta interurbana se realiza a partir de los consumos en electricidad y combustible que estos realizan en el año correspondiente. El resultado se expresa en toneladas de $CO_2$.

### *3.2.1. Emisiones anuales de $CO_2$ de los vehículos eléctricos*

En el caso de vehículos eléctricos, las emisiones de $CO_2$ se determinan en función del factor de emisión del mix eléctrico nacional:

$$\textit{Emisiones } CO_2 \textit{ vehículos eléctricos } (tCO_2) = \textit{Consumo (MWh) x (1000 kWh/MWh) x Factor emisión MIX } (gCO_2/kWh) \textit{ x } (tCO_2/10^6 gCO_2)$$

La Tabla 6 indica cuál es el factor de emisión que la herramienta supone para el Año 0, 2020 y 2030.

El factor de emisión correspondiente al Año 0 se ha tomado de la Memoria Ambiental 2011 de Red Eléctrica de España (REE). Para el resto de los años de referencia, se consi-

| Factor de emisión del mix energético nacional[9] (gramos de $CO_2$/kWh) | Año 0 | 2020 | 2030 |
|---|---|---|---|
| | 255 | 234,6 | 208,6 |

**TABLA 6.** Factores de emisión del mix energético nacional considerados por la herramienta. *Fuente: Elaboración propia.*

deran los compromisos contraídos por España, para cada uno de los años considerados. El factor de emisión correspondiente al año 2020 se ha calculado a partir del compromiso nacional en el paquete verde comunitario, 20-20-20[10] de la UE. En el año 2011 el porcentaje de participación de energías renovables en el mix energético fue del 32,6%, esto supone que para alcanzar el objetivo marcado por la UE en términos de energía final, sería necesario al menos disponer del 40% de la producción eléctrica mediante energías renovables (lo que permitiría alcanzar el 20% en la energía final del mix energético).

El factor de emisión en 2030 se ha calculado tomando como referencia la *Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050, COM (2011) 112 final,* que supone que el sector eléctrico tiene que reducir sus emisiones entre un 54% y un 68% desde el año 1990 hasta el año 2030[11].

### 3.2.2. Emisiones anuales de CO2 de los vehículos que utilizan combustibles fósiles

Para estimar las emisiones anuales de $CO_2$ ($E_{CO2}$) producidas por el consumo de carburante del resto de vehículos (motor de combustión) se utiliza la siguiente ecuación[12]:

$$E_{CO_2} = 44.011\frac{Q}{12.011+1.008r_{H/C}+16.000r_{O/C}}$$

donde $Q$ es el consumo total de carburante y $r_{H/C}$ representa la relación entre el número de átomos de hidrógeno y carbono existente en la composición del carburante. Esta relación es de 1,8 para la gasolina y de 2,0 para el gasóleo. $CO_2$TA toma un valor de $r_{H/C}$ fijo para cualquier carretera igual a 1,96 en el Año 0, que se obtiene de suponer que el reparto del consumo de carburante es de 79% de gasóleo y 21% de gasolina, valor supuesto por el Inventario Nacional de Emisiones[13] y que se supone constante a lo largo de todo el periodo de estudio, y por tanto idéntico todos años de referencia.

[9] Estos factores de emisión consideran las emisiones de $CO_2$ de la planta a la rueda (PTW), mientras que en el caso de los vehículos de combustión interna se tienen en cuenta las emisiones de $CO_2$ del tanque a la rueda (TTW). (Ver Figura 3).

[10] En la COM (2010) 265 final "análisis de las opciones para rebasar el objetivo del 20% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y evaluación del riesgo de fugas de carbono", la Comisión ha demostrado la necesaria reducción de GEI hasta el 30%, si realmente se quiere mantener el impulso de la innovación y de la competitividad.

[11] Las emisiones del sistema eléctrico del año 1990 se han obtenido del Inventario de emisiones –MAGRAMA- y la producción eléctrica de ese año de las Estadísticas Eléctricas Anuales -Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

[12] Fórmula obtenida de simplificar la fórmula que propone el *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated May 2012. 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv Passenger cars, light-duty trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles. EEA, Copenhagen, 2009*, en la que $r_{O/C}$ es la relación entre el número de átomos de oxígeno y carbono en el carburante, cuyo valor es cero para la gasolina y el gasóleo:

$$E_{CO_2} = 44.011\frac{Q}{12.011+1.008r_{H/C}+16.000r_{O/C}}$$

Esta fórmula supone que, en última instancia, todo el contenido de carbono del carburante terminará combinándose con oxígeno para formar $CO_2$.

[13] Fuente: Volumen 2 del Inventario Nacional de Emisiones 1990-2009. tabla 7.2.8.

## 3.3. CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA

El consumo de energía se obtiene también a partir del consumo de combustible y se expresa en Gigajulios (GJ).

En el caso de vehículos eléctricos, el consumo de electricidad, expresado en kWh, se transforma de forma directa en GJ multiplicando por $3{,}6x10^{-3}$ (1 kWh = $3{,}6 \times 10^6$ julios).

En el caso del resto de vehículos, el consumo anual de energía (EJ) a partir de combustibles fósiles se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$E_J = Q \; x \; VCN$$

El valor Q es el consumo total de carburante en kilogramos y VCN es el valor calórico neto del combustible medido en TJ/Gg. El valor de VCN viene determinado por el valor calórico neto de la gasolina (44,3 TJ/Gg) y del gasóleo (43 TJ/Gg) y por la proporción de combustible de cada tipo utilizada por los vehículos que circulan por la carretera. $CO_2$TA toma un valor de VCN fijo para cualquier carretera igual a 43,27 TJ/Gg en el Año 0, obtenido de suponer, como para el cálculo de las emisiones de $CO_2$, que el reparto del consumo es de 79% de gasóleo y 21% de gasolina. Se sigue manteniendo la hipótesis anterior en cuanto a la proporción de consumo de gasolina y de gasóleo en todo el periodo de estudio.

## 4. EXPLOTACIÓN

$CO_2$TA es una herramienta desarrollada en una hoja de cálculo Microsoft Excel®, lo que hace que se pueda usar de forma fácil y sencilla, ya que este entorno es conocido por la mayoría de usuarios. Es de uso totalmente libre y abierto para diferentes tipos de responsables con competencias en diferentes ámbitos relacionados con el sector del transporte por carretera que persigan evaluar de emisiones de $CO_2$.

La herramienta $CO_2$TA se presenta en un archivo comprimido compuesto de dos archivos en formato Excel:

- Archivo 1: *CO2TA(Calcula).*
- Archivo 2: *CO2TA(Compara).*

Cada vez que se aplica CO2TA(Calcula), la herramienta estima las emisiones de $CO_2$ y los consumos de combustible, electricidad y energía de **una única alternativa** para el periodo comprendido entre el año 0 y el año 2030. Los parámetros que definen las características de la carretera y su tráfico las introduce el usuario por tramos y alineaciones (Figura 11).

En los proyectos de carretera se presentan varias alternativas, que están divididas en tramos, y estos, a su vez, se componen de diferentes alineaciones. Por tramo se entiende una parte de la carretera con iguales características de intensidad de tráfico y velocidad media de circulación y por alineación se entiende aquella parte del tramo que tenga características semejantes de pendiente. El usuario debe proporcionar los datos de longitud y pendiente de cada alineación, así como los de velocidad e intensidad de tráfico promedio en cada tramo. La herramienta está preparada para trabajar con un máximo de cinco tramos y 200 alineaciones en cada tramo.

La herramienta calcula el consumo de electricidad y combustible del tráfico de vehículos en cada una de las alineaciones para el periodo estudiado. El consumo total de cada alternativa será el sumatorio de los consumos de cada una de las alineaciones de cada tramo.

Como se ha señalado a lo largo del artículo CO2TA(Calcula) evalúa una sola alternativa cada vez que se utiliza. Esto hace que como **primer paso** sea necesario introducir una serie de datos que caracterizan cada una de las alternativas de un proyecto. De este modo el usuario, va a tener que introdu-

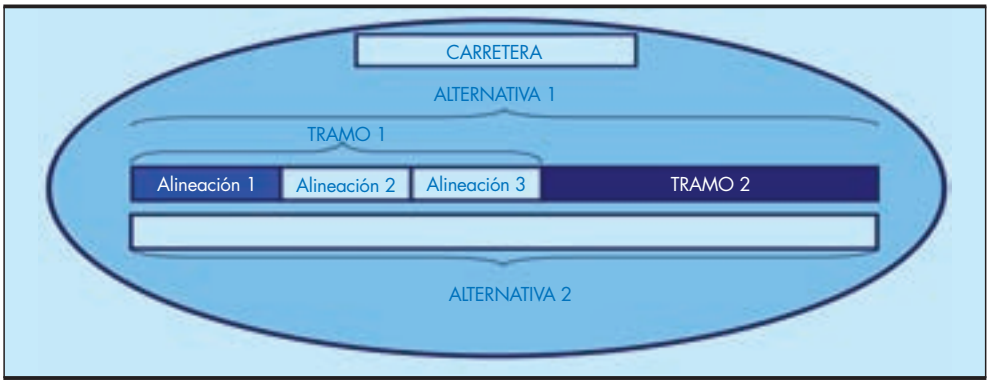



**FIGURA 11.** Organización de una carretera en tramos y alineaciones.
*Fuente: Elaboración propia.*

cir el nombre de la alternativa en cuestión, el año de puesta en funcionamiento y, diferenciando por tramos, el ámbito donde se produce la actuación. Por defecto la herramienta supone localización estatal, pero el usuario puede elegir también una desagregación a nivel de CC. AA. y nivel provincial.

Posteriormente, en **segundo lugar**, CO2TA(Calcula) requiere que se introduzca la velocidad media de recorrido diferenciada para cada tramo estudiado y para vehículos ligeros y pesados en los apartados destinados al Año 0, año 2020 y año 2030.

Como **tercer paso** la herramienta solicita al usuario que defina la intensidad del tráfico en cada tramo objeto de análisis, para el Año 0, 2020 y 2030. La intensidad de tráfico se da como Intensidad Media Diaria (IMD), distinguiendo entre vehículos ligeros y vehículos pesados. CO2TA(Calcula) supone que la IMD de ligeros y de pesados definida por el usuario en cada tramo de carretera se reparte por igual en los dos sentidos de circulación y se aplica a cada sentido de circulación el factor de consumo correspondiente.

Para el año 0 la herramienta asigna la intensidad de tráfico de vehículos ligeros y pesados introducida por el usuario a cada una de las categorías de vehículos $CO_2$TA de la Tabla 1 utilizando los porcentajes medios de movilidad, expresados en vehículos-km, que se producen en la Red de Carreteras del Estado (RCE) en los ámbitos estatal, regional y provincial en el periodo 2006–2010, mientras que para los años 2020 y 2030 estos porcentajes se obtienen de las proyecciones estimadas a partir de los datos de movilidad utilizados para el Año 0. Los datos de movilidad se obtienen del Mapa de tráfico del Ministerio de Fomento, cuya información viene desagregada exactamente en las categorías $CO_2$TA de vehículos de combustión interna, a excepción de los turismos híbridos. No obstante, se empieza a considerar la movilidad de vehículos híbridos y eléctricos a partir del año 2020, suponiendo que este tipo de vehículos participan en la movilidad total de forma proporcional a como lo hacen en el conjunto total del parque nacional. Para poder determinar el parque de vehículos híbridos y eléctricos se parte de las estadísticas actuales de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC) y de otras publicaciones de actualidad, tomando los datos del año 2011 como punto de partida, con los que se obtiene una estimación del parque de este tipo de vehículos en los años considerados como de referencia 2020 y 2030.

En **cuarto lugar** la herramienta permite al usuario introducir un factor de ajuste exógeno si se quieren tener en cuenta otras consideraciones que no están incluidas en la herramienta.

Como **quinto y último paso** el usuario tendrá que introducir los datos de pendiente y distancia de cada una de las alineaciones que forman parte de cada tramo, obteniéndose los **resultados** de consumos de combustible y electricidad, emisiones de $CO_2$ y consumos energéticos.

Una vez que se han evaluado las diferentes alternativas de las que consta un proyecto de transporte por carretera con CO2TA(Calcula) utilizaremos el segundo elemento de la herramienta, CO2TA(Compara). Va a servir al usuario para comparar los consumos energéticos y las emisiones de $CO_2$ de las diferentes alternativas que han sido evaluadas utilizando CO2TA(Calcula).

## 5. VALIDACIÓN

Se han comparado los resultados obtenidos con $CO_2$TA con los obtenidos con otras herramientas análogas de las que se tiene conocimiento.

Para hacer las pruebas de contraste se comparan los resultados obtenidos por $CO_2$TA para el año 0 con los obtenidos mediante el programa COPERT4 versión 10.0 (última disponible) y con la herramienta Huella Energética en la fase de Operación de Autopistas (HERA) desarrollada por el Centro de Investigación del Transporte, TRANSyT-UPM[14] dentro de su participación en el Proyecto OASIS.

La principal conclusión que se extrae de este estudio comparativo es que los resultados obtenidos por $CO_2$TA en los casos de estudio con trazados sin pendiente son del mismo orden de magnitud (Tabla 7) que los obtenidos usando las otras dos herramientas.

[14] Investigadores principales: Andrés Monzón, Natalia Sobrino y Sara Hernández.

**TABLA 7.** Consumo de combustible (t) y Emisiones de $CO_2$ (t) estimadas con las herramientas utilizadas para la validación ($CO_2$TA, COPERT y HERA).
*Fuente: Elaboración propia.*

| PROYECTO EJEMPLO | $CO_2$TA | | COPERT | | HERA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Consumo de Combustible (t) | Emisiones de $CO_2$ (t) | Consumo de Combustible (t) | Emisiones de $CO_2$ (t) | Consumo de Combustible (t) | Emisiones de $CO_2$ (t) |
| **Ligeros** | 161 | 508 | 160 | 507 | – | – |
| **Pesados** | 44 | 137 | 44 | 137 | – | – |
| **Total** | 205 | 645 | 204 | 644 | 203 | 752 |

Si se comparan los resultados obtenidos en $CO_2$TA con los obtenidos a partir de COPERT en relación al estudio de un trazado con cierta pendiente, se produce un incremento en las variaciones existentes. Éstas vienen marcadas, sobre todo, por la consideración de que en $CO_2$TA el tráfico se produce en ambas direcciones de una carretera, mientras que en COPERT no tiene en cuenta esta suposición. Además, es importante señalar que en COPERT, en el caso de los vehículos ligeros, la pendiente no tiene efecto sobre el consumo de combustible, ni sobre las emisiones. Este efecto sí se ha considerado en $CO_2$TA, aunque, en la práctica, no tiene incidencia real en el resultado, al considerar una ecuación lineal para obtener el factor de corrección en función de la pendiente y un reparto de la IMD por sentido del 50% (apartado 3.1.3.1). Por el contrario, en el caso de los vehículos pesados, son significativas las variaciones en los resultados de estas dos herramientas cuando se considera la pendiente, sobre todo a altas velocidades y con pendientes muy marcadas, consecuencia del ajuste matemático del factor de corrección en función de la pendiente para vehículos pesados (apartado 3.1.3.2). No obstante, la influencia de este efecto queda diluida en el resultado final, ya que este tipo de vehículos suponen, de media, en torno al 15% de la intensidad de tráfico en una carretera. A pesar de este último apunte, resultaría de interés seguir mejorando la forma de incluir el efecto de la pendiente en el consumo de combustible, y por tanto las emisiones de $CO_2$, en la herramienta $CO_2$TA, ya que en algunos corredores la participación de los vehículos pesados en la intensidad de tráfico es altamente significativa.

En este sentido, cuando se comparan los resultados de HERA con los obtenidos en $CO_2$TA para los trazados con pendiente se puede concluir algo muy parecido a cuando se comparaba la herramienta $CO_2$TA con COPERT. HERA supone un solo sentido de circulación en cada tramo del proyecto estudiado y, para el caso de vehículos pesados, los parámetros utilizados para introducir el efecto de la pendiente en el consumo de combustible según cada tipología se aproximan mucho a los utilizados por COPERT. Por el contrario, a diferencia de lo que ocurre con COPERT, HERA sí considera el efecto de la pendiente para los vehículos ligeros, aunque no lo aplica de la misma manera que $CO_2$TA.

## 6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La principal conclusión que se extrae de este análisis es que las variables distancia (km) e intensidad de tráfico (IMD), que determinan la movilidad de los diferentes tipos de vehículos, es decir, kilómetros recorridos, afectan de forma proporcional a los resultados obtenidos por la herramienta.

Sin embargo, los cambios producidos en la velocidad media de circulación (km/h) producen variaciones de menor significación en los resultados, incluso cuando la velocidad media cambia de forma significativa. Estas variaciones vienen marcadas por las ecuaciones obtenidas de la parametrización, que relacionan el factor de consumo de combustible en función de la velocidad (apartado 3.1.2). En el caso de los vehículos eléctricos, las variaciones en el factor velocidad no afectan al consumo de electricidad, al considerar la herramienta consumos constantes por cada kilómetro recorrido.

Por otro lado, los cambios en la pendiente (%) afectan a los resultados en mayor o menor medida dependiendo de la variación estimada, aumentando las diferencias con el incremento de la pendiente (Figuras 7 a 9). Estas variaciones sólo afectan a los consumos y emisiones de vehículos pesados, pero no a las de vehículos ligeros, lo que corrobora lo expuesto a este respecto en los apartados 3.1.3.1 y 5. Los cambios producidos en esta variable no afectan al consumo de electricidad.

Por último destacar que cambios en el factor de ajuste producen variaciones proporcionales en los resultados obtenidos.

## 7. CONCLUSIONES

- Se podría definir $CO_2$TA como una herramienta que permite comparar las diferentes alternativas de un proyecto de carretera estimando el consumo de combustible, el consumo de energía y las emisiones de $CO_2$[15] del tráfico de vehículos que circula por una carretera en pauta interurbana[16], cumpliendo de esta manera con los objetivos de carácter preventivo de las normativas que se formulan desde la UE, como son la EIA y la EAE para corregir los impactos ambientales. Además, ayudaría a incluir los conceptos de huella de carbono y huella energética en los procesos de toma de decisiones.
- Es necesario mejorar y actualizar las fuentes de referencia que sirven para obtener las ecuaciones de factor de consumo en función de la velocidad y la pendiente, los factores de emisión de la electricidad o el parque de vehículos, tanto actual como el proyectado a futuro. Para plantear trabajos en este campo sería recomendable profundizar en la metodología de cálculo del parque del futuro, estimar por un lado el crecimiento vegetativo de la población y en su función determinar el nivel de motorización, acorde con las variables de tipo macroeconómico a presuponer para este país. Además, en este trabajo ha quedado patente que el parque de vehículos de mercancías está compuesto por una serie amplia de tipología de vehículos con características diferenciales, en muchos casos mínimas, que sería preciso encajar en menor número de categorías, y a estas categorías asociar el resto de los atributos a medir para la explotación de este tipo de herramientas, en concreto la movilidad. Esta tarea ayudaría en la parametrización de ecuaciones de las distintas tipologías de vehículos pesados. Además de estas mejoras propuestas en relación a la fase de tráfico, resultaría de gran interés estudiar la forma de considerar las emisiones y consumos energéticos relacionados con la vida útil de la fase de infraestructura de un proyecto de transporte por carretera, lo que permitiría tener en cuenta los consumos y emisiones de todas las fases de este tipo de proyectos, tal y como va a requerir la nueva Ley de Evaluación Ambiental.
- Las emisiones del sector de la carretera son de tal importancia en las emisiones globales del transporte que se debería contar en España con un grupo de trabajo que fuera ajustando y validando las herramientas de medida, tanto de emisiones como de consumos de energía, debidas a este modo de transporte. Este grupo se encargaría de introducir de forma homologada los métodos de cuantificación de emisiones acordados en la UE y, más en concreto, los elaborados por grupos que trabajan la metodología COPERT. Un ejemplo que justifica la creación de este grupo ha sido ya expuesto en este documento "en COPERT no se contempla el consumo de energía y emisiones para los vehículos ligeros en función de la pendiente". Esta cuestión no incorporada a la metodología COPERT, debería producirse cuando estuviera lo suficientemente contrastada y cuantificada según los criterios que marca la metodología EMEP/EMEA, así esta tarea podría desempeñarse por esta comisión. Además, este grupo de trabajo podría acometer en el futuro la inclusión en $CO_2$TA, o en otras herramientas análogas, las curvas representativas de consumo de energía y de emisiones que definan los comportamientos de nuevos vehículos y de la movilidad del futuro (movilidad eléctrica).

[15] Las emisiones de $CO_2$ en el transporte por carretera representan la práctica totalidad de emisiones de GEI generadas por este modo de transporte según el Inventario Nacional de emisiones 2011 (99%). Por esta razón la herramienta se va a centrar exclusivamente en la estimación de este gas.

[16] Pauta en la que los vehículos circulan con velocidades medias altas (siempre por encima de los 50 km/h), manteniendo la velocidad relativamente constante y sin que se produzca congestión, de forma que en los vehículos con motores de combustión interna los consumos y las emisiones de $CO_2$ proceden básicamente con el motor estabilizado térmicamente, por encima de 70°C.

– $CO_2$TA aúna muchas de las ventajas de las aplicaciones desarrolladas en anteriores proyectos como COPERT, OASIS y CLEAM, como son su facilidad de uso y su acceso totalmente libre, así como el hecho de incluir un análisis proyectivo de las emisiones de $CO_2$ y consumos energéticos del transporte por carretera hasta el año 2030, lo que permite introducir el concepto de huella de carbono y huella energética en los procesos de toma de decisiones (EIA). Además ha contado en su desarrollo con la supervisión y participación de las administraciones públicas que se encargan de estudiar y prevenir los efectos y consecuencias de los proyectos de carretera en relación al cambio climático.

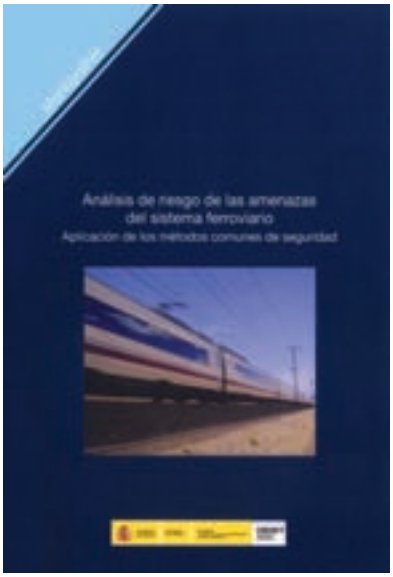
## 8. AGRADECIMIENTOS

Es importante agradecer la ayuda desinteresada que ha prestado en todo momento **Manuel Avilés Lucas**, Jefe de Servicio de Análisis Estadístico de la **Subdirección de Análisis y Vigilancia Estadística de la DGT**, sin cuya colaboración los resultados no hubieran sido los mismos, por la dificultad de obtener y comprender los datos relacionados con el parque de vehículos nacional necesario para desarrollar los cálculos de $CO_2$TA. Este agradecimiento se extiende a la OECC y a TRANSyT. Además, con este ejercicio se reconoce la necesidad de una administración coordinada para implementar herramientas que después conduzcan a la cuantificación de políticas que aseguren el bienestar de los ciudadanos.

## 9. BIBLIOGRAFÍA


– Antonacci, G. Todeschini, I. Cemin, A. (CISMA). 2008. Influence of Road Gradient on Emission Factors. 21st Task Force on Emission Inventories and Projections (TFEIP) meeting. Milán 10 - 11 November, 2008.
– Asociación Española de Profesionales de Automoción (ASEPA). 2010. Vehículos híbridos y eléctricos. Monografías ASEPA 2. ASEPA. Madrid.
– Asín Muñoz, J. 2012. Las infraestructuras de Recarga para el vehículo eléctrico. Revista Ambienta nº100. http://www.revistaambienta.es/WebAmbienta/marm/Dinamicas/secciones/articulos/Ingeteam.htm (acceso 16 de abril de 2013).
– Asociación Española de Fabricantes de Camiones y Automóviles (ANFAC). Estadísticas. http://www.anfac.com/estadisticas.action (acceso 16 de abril de 2013).
– CENIT, Centro de Innovación del Transporte, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). TRANSyT, Centro de Investigación del Transporte, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Departamento de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid (UCM). 2009. Modelo Español de Tarificación de cArreteras (META). Proyecto de Investigación del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Ministerio de Fomento. Madrid.
– Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). 2011. Directrices a considerar en la elaboración del informe de sostenibilidad ambiental para la aplicación de la normativa de planes y programas en infraestructura de transporte, bajo la consideración del cambio climático. CEDEX. Madrid.
– COM (2010) 265 final. Análisis de las opciones para rebasar el objetivo del 20% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y evaluación del riesgo de fugas de carbono.
– COM (2011) 112 final. Hoja de Ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050.
– Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLTRAP) y European Environmental Agency (EEA). 2009. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009, updated May 2012. 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv Passenger cars, light-duty trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles. EEA. Copenhague. http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009 (acceso 16 de abril de 2013).
– Crespo García, L. Montané López, M. García Cortés, A. y Jiménez Arroyo, F. 2012. Implicaciones de la movilidad en las CC. AA. en sus emisiones de gases de efecto invernadero. Monografías, M-109. CEDEX. Madrid.
– Directiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de junio de 2001, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.
– Directiva 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de diciembre de 2011, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.
– Environmental Protection Agency (EPA) y U.S. Department of Energy (DOE). Fuel Economy Guide 2012. EPA y DOE. 2012. http://www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/guides/feg2012.pdf (acceso 16 de abril de 2013).
– European Environmental Agency (EEA), EMISIA, S.A., Joint Research Centre (JRC) European Commission. COPERT4 (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport) versión 10.0. EMISIA S.A. Noviembre 2012. http://www.emisia.com/copert/General.html (acceso 16 de abril 2013).
– Hassel, D. Weber, F. J. 1997. Gradient Influence on Emission and Consumption Behaviour of Light and Heavy Duty Vehicles. TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH. MEET Project. COST 319 Action.
– Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Balances energéticos anuales: 1990 – 2010. http://www.idae.es/index.php/idpag.481/relcategoria.1368/relmenu.363/mod.pags/mem.detalle (acceso 16 de abril 2013).
– Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.
– Ley 6/2010, de 24 de marzo, de modificación del texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero.
– Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Sistema Español de Inventario. Volumen 2: Análisis por Actividades Emisoras. MAGRAMA. http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/volumen2.aspx (acceso 16 de abril de 2013).
– Ministerio de Fomento. 2005-2010. Mapa de Tráfico. Secretaría General de Infraestructuras. Dirección General de Carreteras. Madrid.
– Ministerio de Industria, Energía y Turismo (MINETUR). Estadísticas y Balances Energéticos. Estadísticas Eléctricas Anuales. http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Publicaciones/ElectricasAnuales/Paginas/ElectricasAnuales.aspx (acceso 16 de abril de 2013).
– Ministerio del Interior. 2012. Anuario Estadístico General 2011. Dirección General de Tráfico. Madrid.
– Monzón, A. Sobrino, N. Hernández, S. Huella Energética en la fase de Operación de Autopistas (HERA). Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT). Universidad Politécnica de Madrid (UPM). http://www.hera.transyt.upm.es/ (acceso 16 de abril de 2013).
– Monzón, A. Pérez, P.J. Hernández, S. Sobrino, N. García L.G. 2012. Proyecto Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles (OASIS). Tarea 6: Optimización de los recursos energéticos. Entregable final. Subtarea: Determinación de la Huella Energética en la fase de operación de la autopista. Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT). Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Madrid.
– Proyecto Construcción limpia, eficiente y amigable con el medio ambiente (CLEAM). 2011. Tarea 4.4. Herramienta de cálculo y análisis de las emisiones de $CO_2$ producidas por una infraestructura durante su fase de construcción y de explotación. http://www.cleam.es/investigaciones_categorias/es-emisiones (acceso 16 de abril de 2013).
– Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos.
– Red Eléctrica de España (REE). 2012. Memoria Ambiental 2011. REE. Madrid.
– Stripple, H., Uppenberg, S. 2010. Life cycle assessment of railways and rail transport. Application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothnia Line. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd, Göteborg.
– Technical Research Centre of Finland (VTT). Calculation system for traffic exhaust emissions and energy consumption in Finland (LIPASTO). VTT http://lipasto.vtt.fi/indexe.htm (acceso 16 de abril de 2013).

# EDICIONES DEL CEDEX




**Nº de páginas: 516**
**Año de edición: 2012**
**P.V.P.: 25€**

## ANÁLISIS DE RIESGO DE LAS AMENAZAS DEL SISTEMA FERROVIARIO. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS COMUNES DE SEGURIDAD

Este libro que se presenta, es el compendio del trabajo realizado por un grupos de expertos bajo la dirección del Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX en el área de la seguridad del sistema ferroviario, para la identificación de aquellas amenazas significativas y su riesgo asociado que, en determinadas circunstancias, pueden interferir en el correcto funcionamiento del sistema ferroviario y que, por tanto, deben ser examinadas con especial atención en los procesos de evaluación de los diferentes subsistemas constitutivos del ferrocarril así como en las fases previas de obtención del Certificado de Seguridad para la puesta en servicio de los mismos. Estas amenazas determinan requisitos esenciales de seguridad a tener en cuenta en los Safety Cases de las diferentes instalaciones o equipos para la concesión de la autorización de circulación de un nuevo vehículo o apertura de una línea o sección de línea. La metodología empleada en el proceso sigue las recomendaciones dadas por la ERA relativas a los Métodos Comunes de Seguridad (MCS) para el análisis del riesgo de amenazas y los criterios y los criterios expuestos en la EN 50126. La estructura que da cuerpo a todo el trabajo, es la Base de Datos General de Amenazas Significativas, Hazard Log, obtenida de la identificación y análisis de las amenazas realizado por un grupo de expertos en base a su experiencia, sobre cada uno de los subsistemas establecidos en las ETIs. De las amenazas consideradas se presentan unos Informes en los cuales, además de realizar una breve exposición de la amenaza y porqué se ha considerado, se incluyen las causas, que a juicio del experto, determinan la amenaza y las recomendaciones a seguir para reducir o mitigar su riesgo, es decir, los requisitos esenciales que a la hora de realizar el proyecto se deben tener en cuenta para mitigar o reducir el riesgo de la amenaza. En definitiva, este libro constituye una herramienta importante de ayuda en el seguimiento de la seguridad del sistema ferroviario y tiene también como objetivo la transmisión de experiencia sobre el funcionamiento real de los subsistemas ferroviarios y de sus puntos más críticos.

## GUÍA TÉCNICA SOBRE TUBERÍAS PARA EL TRANSPORTE DE AGUA A PRESIÓN

La "Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión" es el resultado de un trabajo realizado en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX por encargo de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente. Tiene por objeto compilar la normativa y reglamentación vigente sobre la materia, así como establecer unos criterios generales en lo relativo al proyecto, instalación y mantenimiento de tuberías para el transporte de agua a presión, independientemente de cual sea su destino final (abastecimientos, regadíos, etc.).

**Nº de páginas: 438**
**Año de edición: 2009**
**Reimpresión: 2013**
**P.V.P.: 40€**

## Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid
Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: +(34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

# Análisis integral de cauces usando trazadores: Un procedimiento óptimo de Calibración y Validación de Modelos de Calidad del agua

ALFREDO JOSÉ CONSTAIN ARAGON (*) y JORGE LUIS CORREDOR RIVERA (**)

**RESUMEN** Los modernos paquetes de software que sustentan los modelos matemáticos para la simulación y predicción de los eventos asociados a la calidad del agua son cada vez más sofisticados y complejos; son una herramienta invaluable para la gestión eficiente del recurso hídrico en nuestro mundo actual. No obstante lo anterior, su calibración y validación en aplicaciones específicas es una tarea no trivial y es costosa en términos de recurso humano y laboratorio. Las razones para esta dificultad son variadas, pero una de las más importantes es la *heterogeneidad estadística* de las mediciones tomadas de diversa fuente, lo que se refleja en la dificultad de establecer congruencias entre las colecciones de datos para aplicar a los modelos.
Se presenta en este artículo un método de medición "integral" que ofrece datos homogéneos en flujo, transporte y geomorfología usando trazadores. Como novedades conceptuales se parte de dos ecuaciones que enlazan el transporte con la hidráulica, y el transporte con la geomorfología. Se enumeran las ventajas de este nuevo método, en especial el cálculo correcto del caudal en diferentes puntos del cauce y la aplicación congruente del Número de Manning en casos de flujos de gran pérdida. Se aplica el método a un cauce de montaña de este tipo en Bogotá, Colombia.

## INTEGRAL ANALYSIS OF STREAMS USING TRACERS: AN OPTIMAL CALIBRATION AND VALIDATION PROCEDURE FOR QUALITY OF WATER MODELS

**ABSTRACT** *The modern software packages that hold the mathematical models for simulation and prediction of water quality events are more and more sophisticated and complexes; are a invaluable tool for efficient management of hidric resources in our today´s world. Despite those previously mentioned, their calibration and validation in specific applications is a non-trivial task and is expensive in terms of human and laboratory resources. The reasons behind this difficult are varied, but one of most important is the statistical heterogeneity of measurements taken from several sources, reflecting it in the difficult of state congruence among these data collections to apply in models.*
*It is presented in this article an "integral" measurement method that offers homogeneous data for flow, transport and geomorphology using tracers. As conceptual novelties it is starting from two equations that links transport and hydraulics, and the transport and geomorphology. It is enumerated the advantages of this new method, specially the right calculation of discharge in several points of stream and the congruent application of Manning´s Number in case of flows of large losses. It is applied this method to a mountain stream of this kind in Bogota, Colombia.*

***Palabras clave:*** Modelos de calidad de agua, Técnicas de trazador.

***Keywords:*** Water quality models, Tracer techniques.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. NATURALEZA DE LOS MODELOS DE CALIDAD DE AGUAS

Los Modelos de calidad de aguas, como herramientas fundamentales de la administración del recurso hídrico, son actualmente complejos paquetes de software que representan con mayor o menor precisión los múltiples movimientos del agua y los solutos transportados por ella, en tiempo y espacio. Estos paquetes se basan en la codificación digital de las leyes de la hidráulica (flujo), del transporte de masa (distribución de

(*) Ingeniero, R&D Manager, Amazonas Technologies, Bogotá, Colombia. E-mail: alfredo.constain@amazonastech.com
(**) Profesor, Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. E-mail: jorge.corredor@unimilitar.edu.co

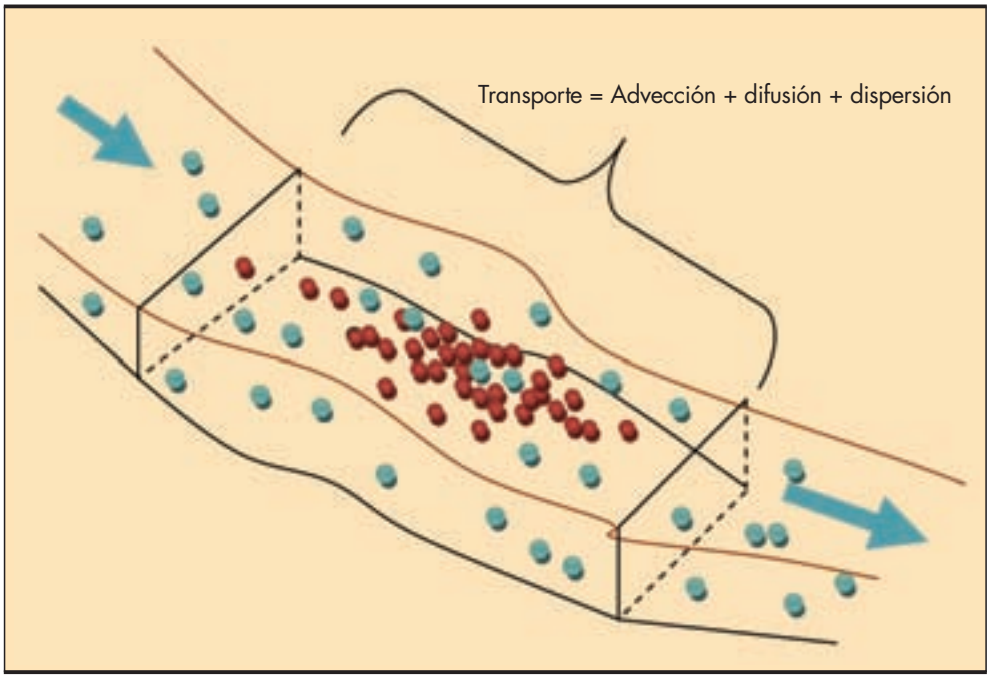



**FIGURA 1.** Movimiento complejo del agua y solutos en el flujo.

los solutos) y en la geomorfología de los cauces y lechos mediante la representación en grillas discretas del entorno geométrico de los flujos. (Martin & McCutcheon, 1999) (Sierra.2011). Figura 1.

El movimiento del agua (partículas azules) en un flujo natural determina en gran parte la distribución dinámica de las partículas de los solutos (esferas rojas) que se mueven en el líquido, adicional a la capacidad de dispersión (Desperdigamiento) del mismo flujo por su acción cortante en presencia de distribuciones de velocidad. Todo esto está condicionado al lecho del cauce y otros factores de dinámica y forma que inducen resistencia al flujo. La Hidráulica aplicada al cauce se expresa matemáticamente por el principio de conservación del impulso, el desarrollo de la dispersión en combinación con la advección se condiciona al principio de conservación de la masa y las distribuciones de temperatura en el cuerpo móvil considerado se expresa por el principio de conservación de la energía. La Geomorfología es el sustrato geométrico y físico en el que se desarrollan los anteriores procesos y que se influencian mutuamente. Estos modelos también deben dar cuenta de las reacciones químicas que cambian la naturaleza de los compuestos participantes en el flujo, así como las contribuciones (o disminuciones) de masa denominadas genéricamente "fuentes" y "sumideros".

En su acepción más general un Modelo de Calidad de agua se presenta como una ecuación diferencial de balance en el que un término temporal que informa sobre la "acumulación neta de masa" en un *volumen de control* que es sensible a las variaciones espaciales de transporte (advectivo y dispersivo/difusivo), a las variaciones temporales de cambio de especie química por reacciones químicas y a las adiciones o resta de masa por contribuciones externas. Muchas de las reacciones químicas presentes serán de naturaleza bioquímica, dadas las múltiples interferencias de la biota y el hombre en los cauces naturales. El volumen de control es una idealización útil para fijar fronteras al análisis de un determinado sistema (cuerpo de agua) la que para efectos prácticos se considera un "continuo" a pesar de que la conceptualización de la dispersión en el flujo se hace mejor considerando partículas discretas. Figura 2.

Todo modelo de calidad de aguas esta propuesto no solo para describir estos complejos movimientos y reacciones sino también, y principalmente, para poder *simular* y *predecir* eventos extremos de interés para los especialistas que los utilizan. Normalmente se va a utilizar el concepto de "concentración" o sea la masa por unidad de volumen de una determinada especie química o biológica. La simulación y la predicción como propiedades de estos sistemas imponen estrictas condiciones de realismo a las descripciones matemáticas usadas, o sea representar de manera fidedigna los diversos procesos físico-químicos que ocurren en el interior del volumen de control. Esta imposición vital exige que los diferentes mecanismos de los fenómenos considerados sean correspondientes a sus verdaderas relaciones "causa-efecto". Los modelos se deben aplicar a tramos concisos que puedan caracterizarse inequívocamente y que por lo tanto se facilite la definición de los diferentes parámetros y variables.

En la práctica los modelos mencionados, que como ya se dijo en realidad son un conjunto de ecuaciones diferenciales para representar tanto la conservación del impulso (flujo), como la conservación de la masa (transporte, reacciones y fuentes/sumideros) así como la conservación de la energía (distribución de temperaturas), deben ser representadas en códigos digitales y aplicados al entorno geométrico especifico que se vaya a modelar (geomorfología). Dadas las restricciones de representación analítica para ecuaciones *continuas* de este tipo se prefiere usar aproximaciones discretas mediante métodos numéricos. Estos métodos se aplican entonces al conjunto espacial de celdas o grillas que representaran unidades básicas de proceso para acoplarse entre sí y dar un resultado global, obtenido por potentes procesadores que corren las rutinas de software. El uso de sistemas coordenados impone de entrada la necesidad de acopiar datos batimétricos suficientes sobre los límites físicos reales de un flujo en consideración. Figura 3.

Es necesario por otra parte distinguir y definir diferentes variables "independientes" y "dependientes" para conceptuali-

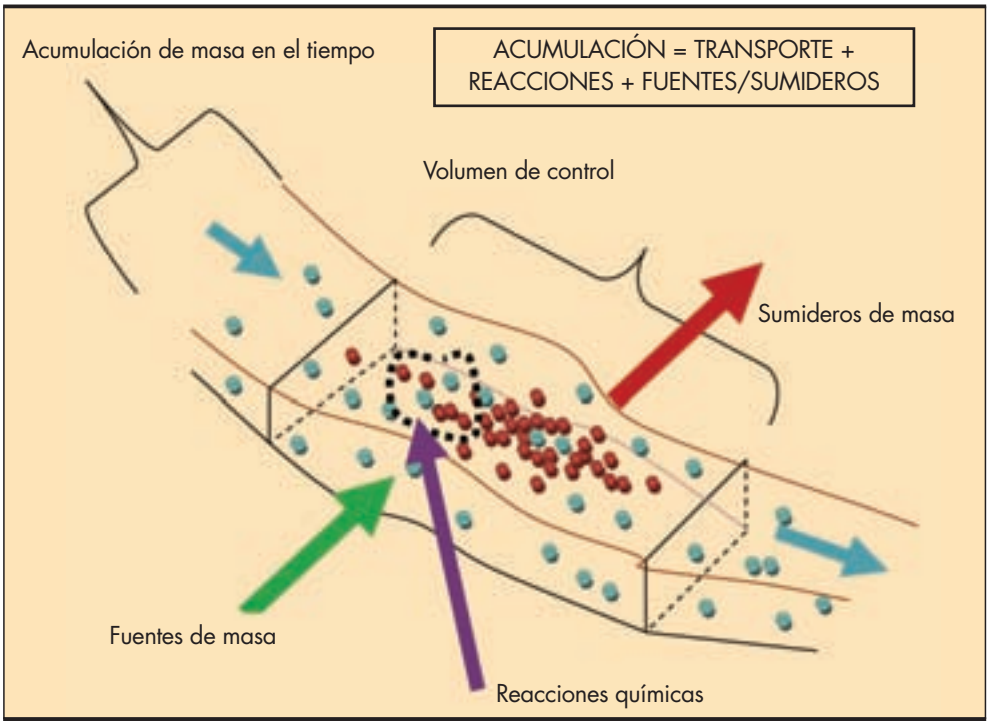



**FIGURA 2.** Esquema general de un Modelo de calidad de agua.

zar la representación del flujo apropiadamente. Las variables independientes son simplemente aquellas que se definen de entrada y no se "simulan", las variables dependientes son por el contrario las que si resultan de la simulación (corrida) del programa. Algunas variables son a la vez independientes y dependientes pues a veces son requeridas como datos de entrada y a veces como producto de la simulación, son definiciones *relativas* que se acomodan a la fase en la que se encuentra el especialista del modelo.

### 1.2. DATOS DEL MODELO

Es necesario disponer de datos diversos para configurar el modelo. Estos son sobre: Condiciones de frontera y Condiciones iniciales

#### *A. Condiciones de frontera*

Son normalmente las variables independientes (no simuladas) asociadas a la geometría y las fuerzas que ocasionan los

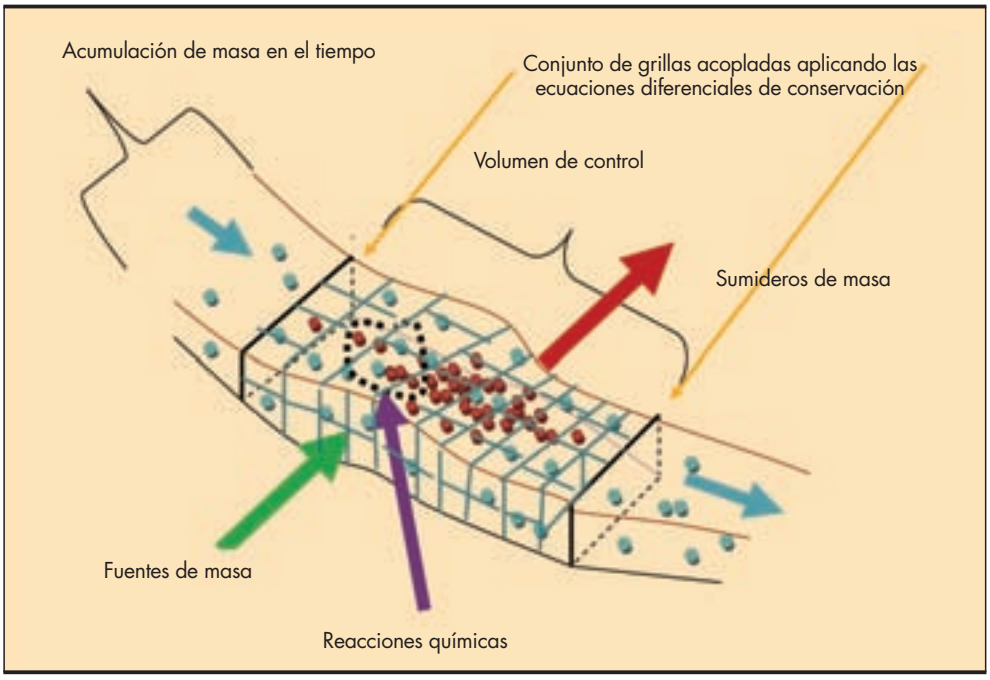



**FIGURA 3.** Grillas distribuidas para aplicar las ecuaciones en cada celda.

cambios a modelar, por lo tanto es la enumeración de caudales de entradas y salidas, del flujo de calor, de la acción del viento y de la radiación, por ejemplo. La batimetría (o información geomorfológica) es claro está un conjunto de condiciones de frontera validas por sí mismas. Este incluye las alturas de los diferentes puntos de superficie, pendientes, anchos y también condiciones de resistencia asociadas al lecho o al tipo de flujo (Numero de Manning por ejemplo). Por su propia naturaleza este conjunto de informaciones debe ser sobre un tramo homogéneo del cauce como ya se dijo.

#### *B. Condiciones iniciales*

Son valores requeridos en un instante inicial para poder iniciar la corrida dinámica del programa. Por ejemplo son importantes los valores de velocidad en diferentes puntos de la grilla, o la velocidad media, etc. Igualmente los datos distribuidos de temperatura, altura y concentraciones. En este caso al correrse el programa sus valores subsecuentes serán simulados. Algunas veces este conjunto de valores iniciales no es muy importante dependiendo del "tiempo de retención" estimado (tiempo promedio que una partícula de soluto dura en atravesar el tramo).

Los datos que se obtengan deberán ser consistentes con la "dimensionalidad" del modelo utilizado. Esta característica tiene que ver el procedimiento de "promediacion" (integración) que hacen los algoritmos numéricos sobre determinada variable de interés, aplicada a las ecuaciones tridimensionales. Según sea general esta integración se tendrán modelos de "0-dimension" (la más general) hasta "3-dimension" la mas especifica. Debe notarse que esta característica es más bien "matemática" que "física", en tanto se escoja un determinado trabajo matemático sobre las grillas. Su uso e interpretación será a cargo del especialista.

### 1.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Los referidos modelos matemáticos corridos en software tendrían poca o ninguna utilidad práctica real sino hubiese una forma de particularizar su aplicación a cada cauce real de interés para el especialista. Este proceso se denomina "calibración" y generalmente es un proceso continuo de prueba y error, dispendioso por demás.

En primer lugar debe saberse que existen ciertos "parámetros" del modelo, es decir coeficientes de las ecuaciones que deben ser conocidas para cada caso específico. En general, los modelos tienen los 3 conjuntos de ecuaciones diferenciales de balance: flujo, transporte y transformaciones con pérdidas y ganancias y temperatura, desarrollándose sobre la información geométrica de entrada. Cada conjunto tendrá una serie de coeficientes que deben ser conocidos, con el fin de que las ecuaciones puedan correrse y simular diferentes escenarios. Dependiendo de la propia arquitectura del modelo, el manual de usuario especifica que información deberá ser recogida y en que secuencia.

La CALIBRACION como tal es el ajuste del programa con un conjunto de informaciones iniciales que aseguran que el modelo puede correr de manera verificable y confiable. La VALIDACION son ejercicios subsecuentes sobre la efectividad de la CALIBRACION a partir de otros conjuntos de datos en situaciones diferentes. No es difícil ver entonces que el éxito de un determinado modelo de Calidad del agua depende en una gran medida de la fiabilidad y cantidad de información que se use en su aplicación. La CALIBRACION comprenderá entonces básicamente disponer de valores específicos para los diferentes parámetros y variables del modelo (flujo, transporte, cinética química, comportamiento béntico, superficial, etc.)

### 1.4. NATURALEZA DE DATOS INGRESADOS AL MODELO

En función de lo anterior, la selección de los métodos y condiciones de monitoreo y medición en los cauces que van a ser modelados es una labor critica al inicio del proceso. En primer lugar se debe entender que si las "concentraciones" (de diversas sustancias o cuerpos) son un objetivo primordial de los trabajos de simulación, es apenas natural que se van a requerir mediciones correspondientes a "mezcla completa en la sección transversal" (donde las concentraciones tienen un efecto global en el cauce) y que el experimentador deberá conocer un valor fiable de la llamada "Longitud de mezcla" en el tramo estudiado. En segundo lugar se debe atender a la compatibilidad de las diferentes medidas que se hagan, tanto de flujo, como de transporte y de geomorfología. Desafortunadamente en el estado del arte actual, pese a tener medios tecnológicos muy sofisticados, en esencia las diferentes clases de mediciones hechas actualmente para calibrar los modelos no son "a prori" *compatibles*. Con esto se quiere decir que el principio de medición es *diferente* en cada una de ellas. Por ejemplo para la medición del caudal se utiliza el molinete o "current meter" que opera sobre una transducción mecánica-eléctrica, mientras que para la velocidad media se utilizan trazadores con un mecanismo mixto físico-químico y para estimar la pendiente se usan otros procedimientos diferentes. En el mejor de los casos se puede esperar una cierta congruencia de estos valores, pero esto no siempre pasa pues no hay una *obligación metodológica* para que eso ocurra (Spiridonov & Lopatkin, 1973). Es el problema de la falta de *homogeneidad estadística* en datos tomados de diferentes poblaciones generales (o sea de diferentes métodos de medición), las cuales pueden conllevar *varianzas* y *valores medios* no congruentes si son medidos por criterios estadísticos como el de Bartlett o Kokren (Gmurman, 1975). Esto puede conllevar serios problemas de interpretación al experimentador cuando reuna la masa de datos si estos provienen de diversa fuente. (Mandel, 1964). Figura 4.

En este artículo se analizara una propuesta para utilizar trazadores a partir de dos innovaciones conceptuales: Una ecuación de la velocidad media que incluye el transporte y la redefinición de la ecuación de Elder de 1959 que une transporte con geomorfología. De esta manera se puede disponer de un solo método *homogéneo* de medición que aporte informaciones compatibles en los tres campos básicos.

## 2. LOS TRAZADORES COMO METODOLOGÍA IDEAL DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE CALIDAD DE AGUA

### 2.1. ANTECEDENTES

Pese a que el uso de trazadores para mediciones en los cauces no es reciente, su uso tradicionalmente se ha reducido a chequeos del *tiempo de viaje* o a calcular el *coeficiente de dispersión*, esto no obstante que este método es el que inherentemente aporta mayor densidad de información. Es cierto que existen errores sistemáticos que impiden una medición del caudal de forma fiable y que la ecuación de Elder que enlaza la pendiente de fricción con el transporte ha sido relegada por una presunta imprecisión. Pero no lo es menos que con nuevos métodos estos inconvenientes pueden ser corregidos, aportando una serie de datos *homogéneos* en los diferentes campos de la Calibración y validación de modelos.

### 2.2. UNA ECUACIÓN DE VELOCIDAD QUE SE RELACIONA CON EL TRANSPORTE

Se puede mostrar que existe una relación determinada entre la velocidad media advectiva (hidráulica), $U$ y el coefi-

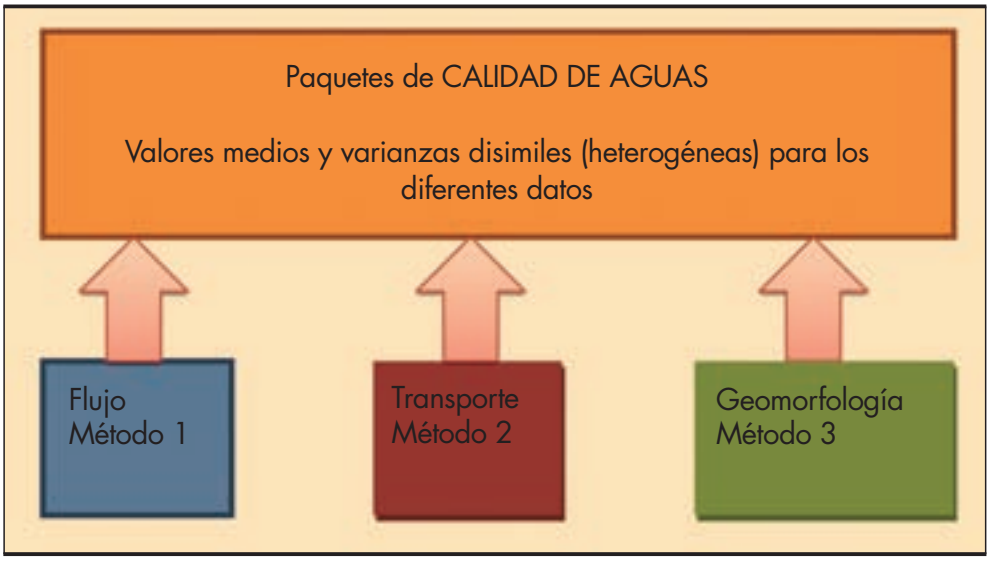



**FIGURA 4.** Calibración y Verificación por datos desde fuentes diferentes.

ciente longitudinal de dispersión, $E$ (Constain y Lemos, 2011):

$$U = \frac{1}{\phi(t)}\sqrt{\frac{2E}{\tau}} \quad (1)$$

Esta ecuación representa un enlace inédito entre la hidráulica y el transporte dispersivo. La función $\Phi(t)$ mide la evolución de la pluma de trazador y $E$ mismo es una función del tiempo; $\tau$ es un tiempo característico de la dispersión. Es interesante observar como esta ecuación tiene la misma estructura que la definición de Chezy para régimen uniforme, basada en la geomorfología, donde $C$ es el Coeficiente de Chezy, $R$ es el Radio hidráulico y $S$ la pendiente de fricción:

$$U = C\sqrt{RS} \quad (2)$$

### 2.3. UNA ECUACIÓN CLÁSICA QUE RELACIONA TRANSPORTE DISPERSIVO CON LA GEOMORFOLOGÍA

La ecuación de J.W.Elder, propuesta en 1959 (Elder, 1959) que involucra un parámetro de geomorfología (pendiente de friccion), $S$ en función del transporte dispersivo, fue durante un tiempo una ecuación muy usada por su fundamentación sólida sobre principios de la mecánica de fluidos, no obstante cayó en desuso al verificarse que sus valores eran muy dispersos y muchas veces diferían significativamente de aquellos obtenidos por métodos de "referencia" como el de "Routing" propuesto por H.B. Fischer. (Fischer, 1966)(Fischer, 1967)(Fischer, 1968) (Fischer, 1969).

$$E = 5.93h\sqrt{ghS} \quad (3)$$

Algunos desarrollos recientes indicarían que esta ecuación es correcta y que más bien los procedimientos de referencia

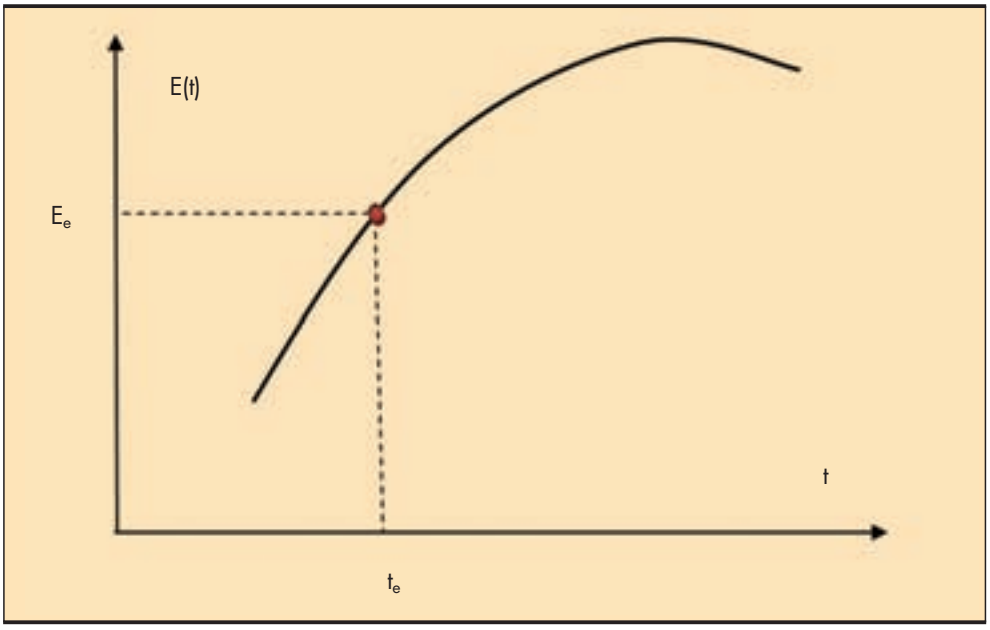



**FIGURA 5.** Solución de Elder como un punto de un rango.

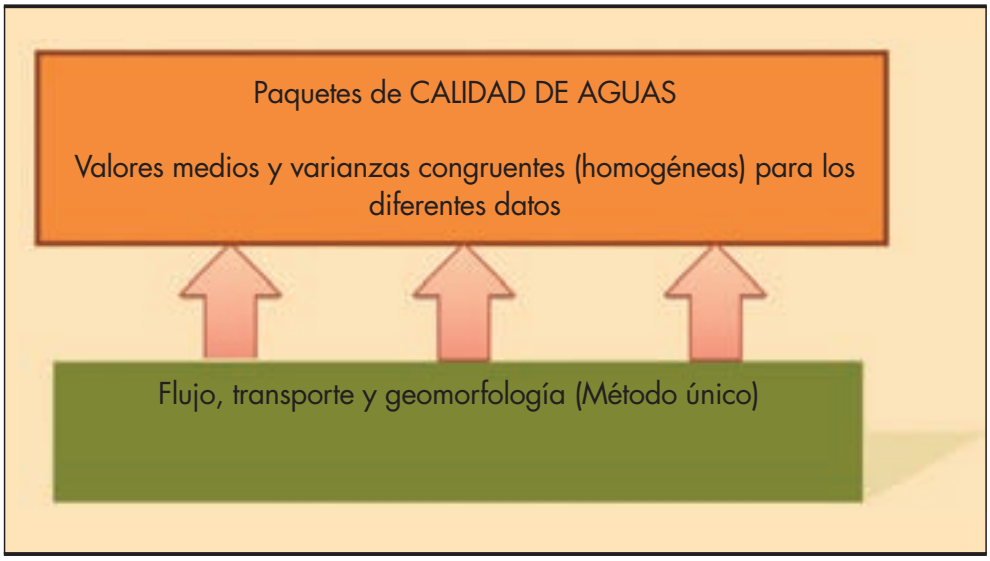



**FIGURA 6.** Calibración y Verificación optima con trazadores.

no eran precisos (Constain y Mesa, 2013) (Constain, 2013). Esto es así por cuanto si se acepta que el coeficiente $E$ es una función del tiempo, entonces deberá buscarse para que circunstancias el valor dado por Elder aparece en un punto especifico ($E_e$, $t_e$) de un rango. Figura 5.

### 2.4. UNA FUENTE HOMOGÉNEA DE DATOS PARA CALIBRAR Y VALIDAR LOS MODELOS

Si lo anteriormente expuesto es cierto, entonces se puede usando trazadores suministrar datos de Hidráulica, transporte y geomorfología a partir de un *único* procedimiento de medición. Estos datos van a tener entonces una naturaleza estadística común, es decir serán *homogéneos.* Esta característica es invaluable en el momento de Calibrar y validar los paquetes de Calidad de Aguas, ya que se tendrá una compatibilidad significativa entre los distintos datos, con el consiguiente mejoramiento en la calidad y congruencia de los resultados. Figura 6.

## 3. CÁLCULO DEL VALOR REAL PARA EL CAUDAL EN RELACIÓN CON LA "MEZCLA COMPLETA" DEL TRAZADOR

Corrientemente se calcula el caudal con trazadores por medio del principio de conservación de la masa (integral bajo la curva de trazador) pero una vez que la distribución volumétrica de la masa de trazador sea homogénea, es decir una vez que el trazador se haya mezclado completamente en la sección transversal. Como la función $\Phi(t)$ es en realidad una "función de estado", va a ser sensible a esta condición termodinámica en la que se pierde un grado de libertad. En tal virtud, $\Phi(t)$ llevara la información de la "disponibilidad efectiva" de la masa de trazador para calcular $Q$. En situaciones *anteriores* a la "Longitud de mezcla", la distribución másica del trazador no será homogénea y habrá una cantidad efectiva *menor*, induciendo a un error en el cálculo del caudal pues el dato de masa no será el que se ha vertido. Los autores han desarrollado una estimación simple para esta situación mediante la gráfica de la Figura 7. (Constain, 2012)

La razón de masas se define como: La masa nominal dividida por la masa efectiva. Se puede ver que hasta un valor asintótico de $\Phi \approx 0.5$ ellas son iguales, ya que en este rango [$\Phi=0, \Phi=0.5$] el trazador está en "mezcla completa" en la sección transversal. Para valores más altos (o sea distancias más cortas) habrá una diferencia entre ellas (será menor la masa efectiva) y el caudal tendrá un error proporcional a la razón, $Rq$.

## 4. CÁLCULO DE LA PENDIENTE Y LA RUGOSIDAD CON LA ECUACIÓN DE ELDER Y LAS NUEVAS ECUACIONES

Si se acepta que la ecuación de Elder debe ser ajustada en un rango como se explico en 2.3 entonces se puede despejar la pendiente pero utilizando como variable independiente el valor de E(t) encontrado por trazadores.

$$S = \frac{E(t)^2}{35.2 \times h^3 \times g} \tag{4}$$

Ahora, igualando las dos ecuaciones de velocidad media (1) y (2) se puede redefinir la ecuación de Elder y obtener una "función de ajuste", F, igual al coeficiente 5.93 en el caso de acople optimo.

$$F = \left( \phi^2 \tau \frac{C^2}{2} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{S}{g\,h}} \right) = \frac{0.404}{\kappa^3} = 5.93 \tag{5}$$

Este ajuste se hace por prueba y error hasta que se obtiene la condición ideal en (5).

Para la aplicación concordante de estas ecuaciones en lo correspondiente a la Rugosidad, deberá tenerse en cuenta una visión ampliada de este concepto según Manning, ya que para ciertos cauces (en especial aquellos ríos de montaña con secuencia "piscina-rápido") las pérdidas de energía por el cambio de forma del flujo son significativamente mayores que las correspondientes a la rugosidad clásica de "grano" y se tiene un Numero de Manning total. (Vélez Upegui *et alt*, 2004).

$$n_{Total} = n_{grano} + n_{forma} >> n_{grano} \tag{6}$$

## 5. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TEORÍA: QUEBRADA "LA VIEJA"

Se presenta ahora un cauce natural típico de montaña, la quebrada "La Vieja" en los cerros orientales de la capital colombiana, Bogotá. Figura 8. Este cauce se caracteriza por te-

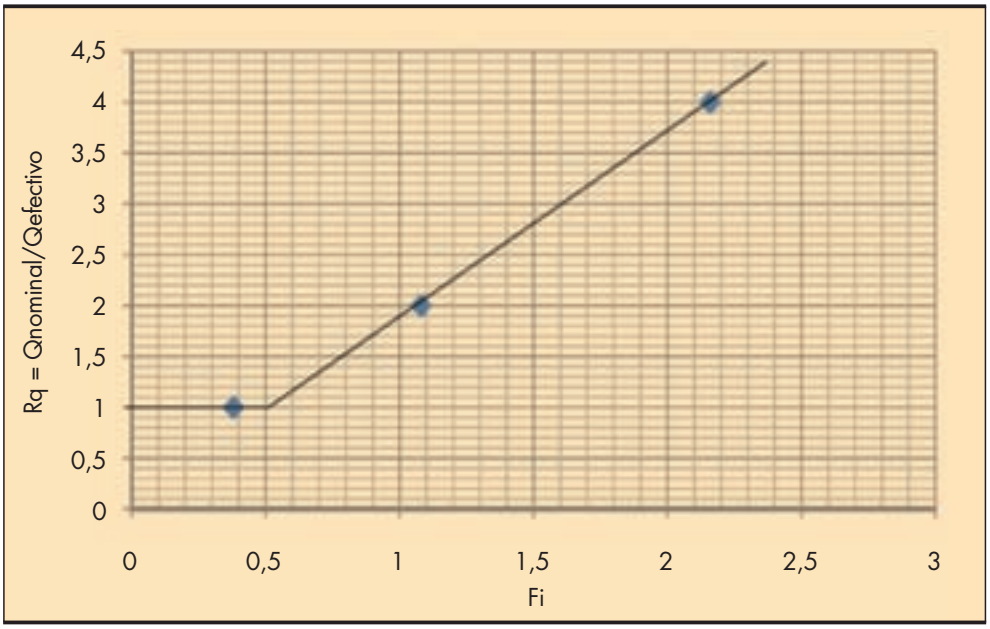



**FIGURA 7.** Razón de masas en función de $\Phi$.

**FIGURA 8.** Aspectos del cauce y medición en el tramo.

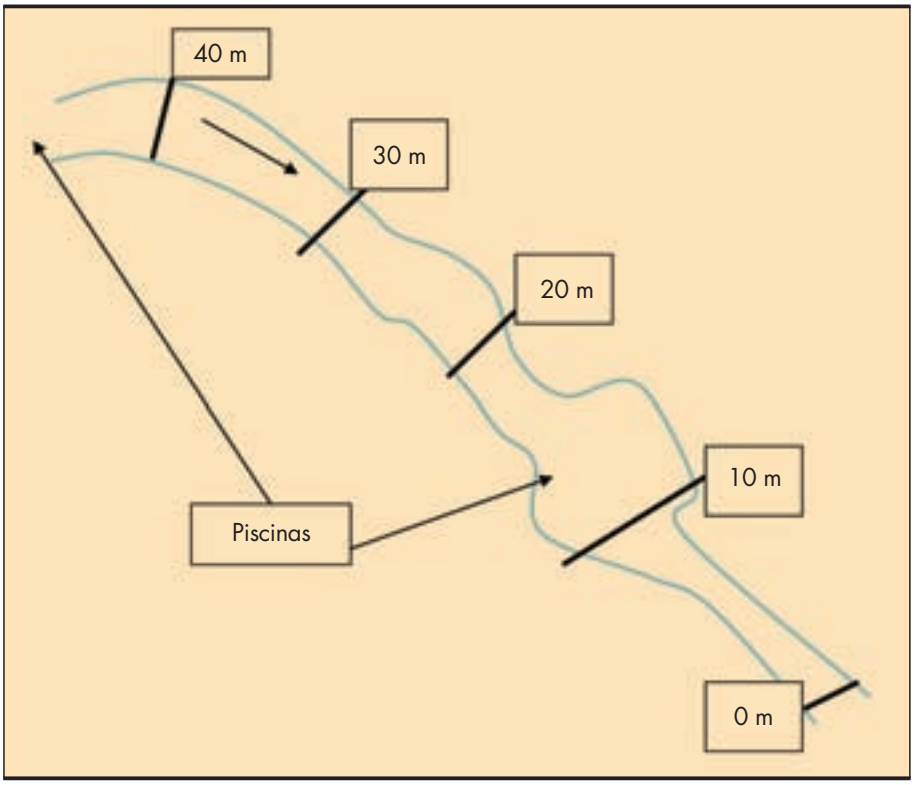



**FIGURA 9.** Tramo escogido y sitios de inyección y batimetría.

ner secuencia de represamientos y rápidos, por lo que presumiblemente el componente de cambio de forma del flujo sea el mayor responsable de la perdida de energía, mostrando un Numero de Manning significativamente mayor al asignado a la sola rugosidad superficial. Se utiliza el instrumento "Ínírida Deep Flow" (IDF) para tomar las mediciones de trazador salino en tiempo real.

### 5.1. TRAMO ESCOGIDO

Se hace un croquis en planta del tramo escogido. El vertimiento se hace sucesivamente a 10 m, 20 m y 40 m. Se muestra los sitios donde hay piscinas (zonas de baja velocidad). Figura 9.

### 5.2. PERFILES DEL FONDO EN 4 PUNTOS NOTABLES

Se hacen mediciones representativas de batimetría simple a X=0 m, X= 10 m, X=20 m y X=30 m. La línea punteada indica la profundidad promedio calculada con Excel. Figura 10.

Se puede estimar la profundidad media total (para el tramo) como *H=0,096 m* y el ancho promedio total (para el tramo) como *W=1,80 m.*

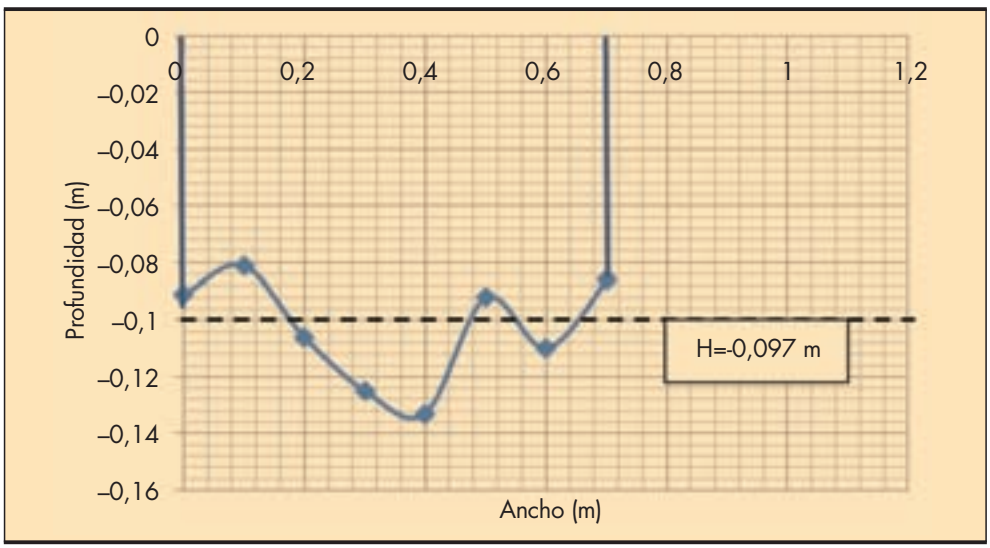



**FIGURA 10A.** A X=0 m. Perfiles del lecho para puntos notables.

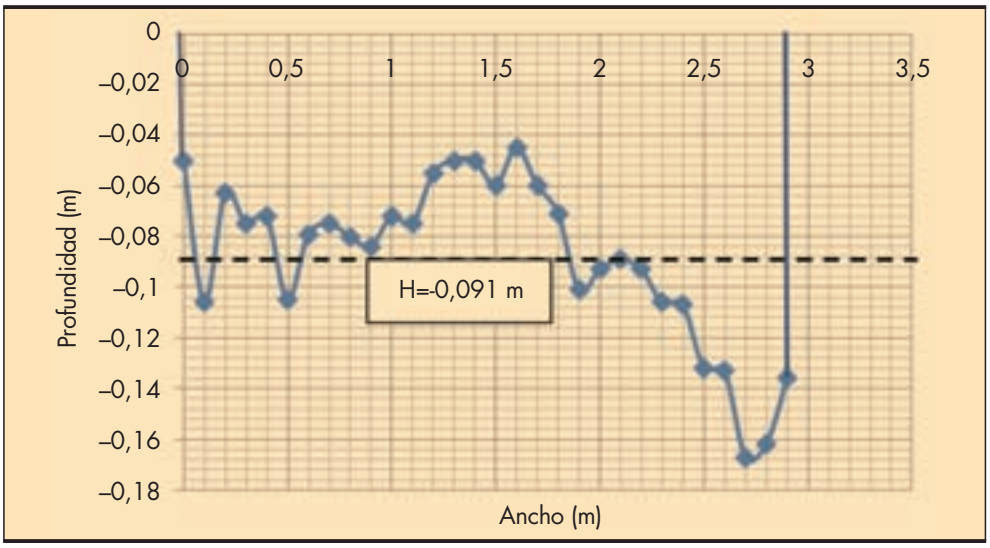



**FIGURA 10B.** A X=10 m. Perfiles del lecho para puntos notables.

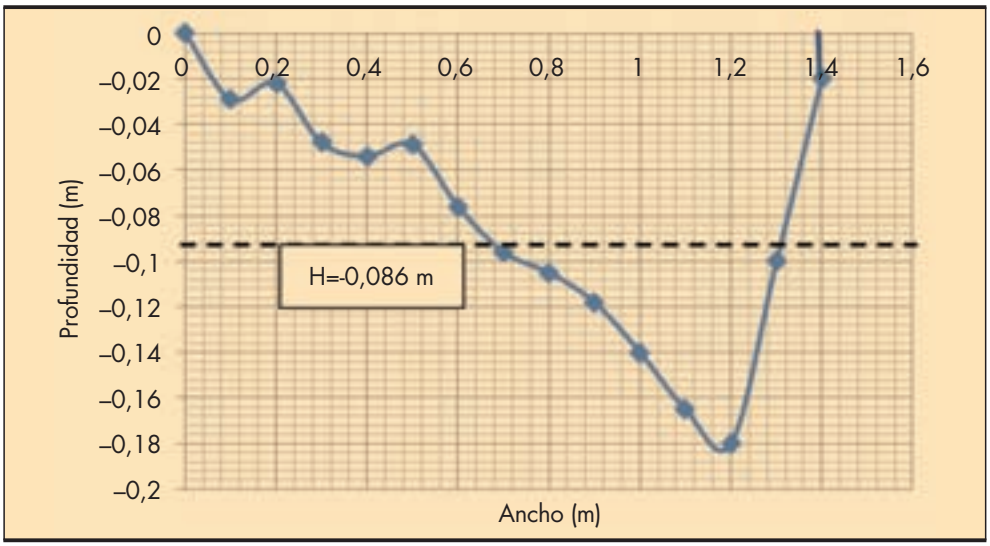



**FIGURA 10C.** A X=20 m. Perfiles del lecho para puntos notables.

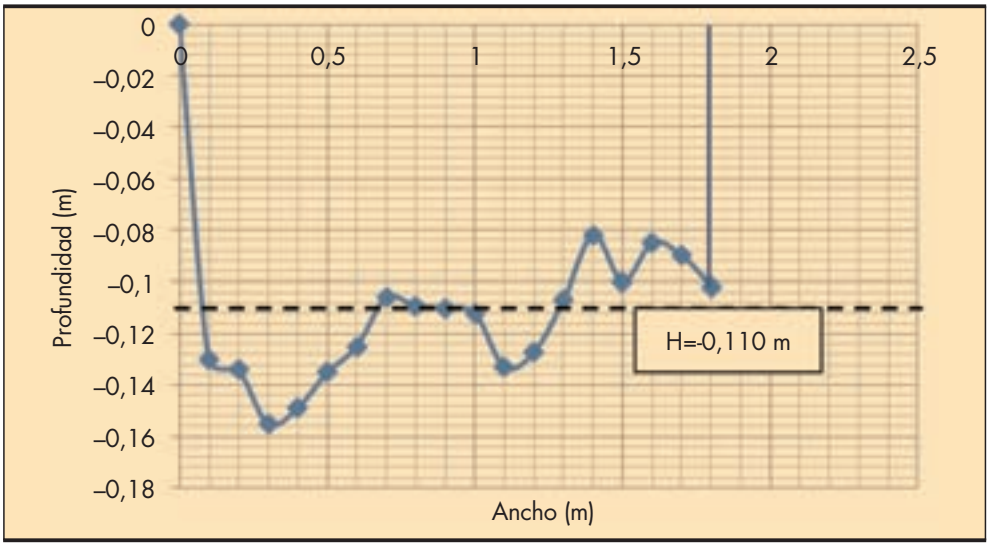



**FIGURA 10D.** A X=30 m. Perfiles del lecho para puntos notables.

| Distancia (m) | Ancho total (m) | Profundidad media (m) | Área de la sección transversal Promedio ($m^2$) |
|---|---|---|---|
| X=0 m | 1,0 | 0,097 | 0,097 |
| X=10 m | 2,90 | 0,091 | 0,264 |
| X=20 m | 1,40 | 0,086 | 0,120 |
| X=40 m | 1,80 | 0,110 | 0,198 |
| **Promedio** | **1,80** | | |
| | **Promedio** | **0,096** | **0,170** |

**TABLA 1.** Promedio General de Profundidades.

Se puede estimar la profundidad media total (para el tramo) como *H=0,096 m* y el ancho promedio total (para el tramo) como *W=1,80 m*.

### 5.3. CURVAS DE TRAZADOR

Se hicieron 3 vertimientos súbitos (slug) a X=10 m, X=20 m y X=40 m. las dos primeras con 136 gramos de sal y la ultima con 116 gramos. Los instantes de vertimiento se muestran con flechas rojas. Figura 11.

### 5.4. DATOS EXPERIMENTALES

Los datos crudos del IDF se depuran mediante modelación de las curvas experimentales por las ecuaciones corregidas de Fick que tiene programado el método utilizado. En la Figura 12 se muestran las tres modelaciones, siendo

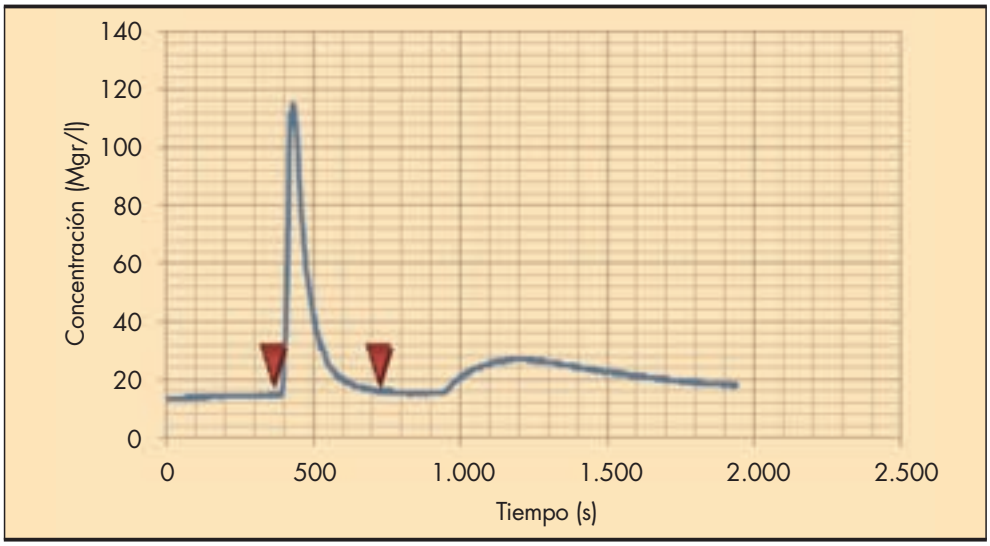



**FIGURA 11A.** A XA. X=10 m y X=20 m. Curvas experimentales bajadas del IDF.

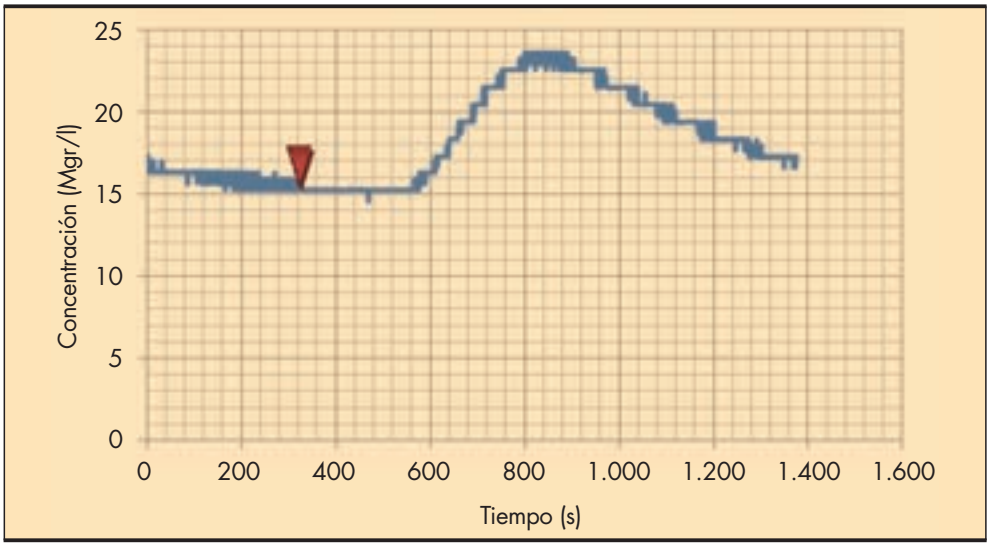



**FIGURA 11B**. B, X=40 m. Curvas experimentales bajadas del IDF.

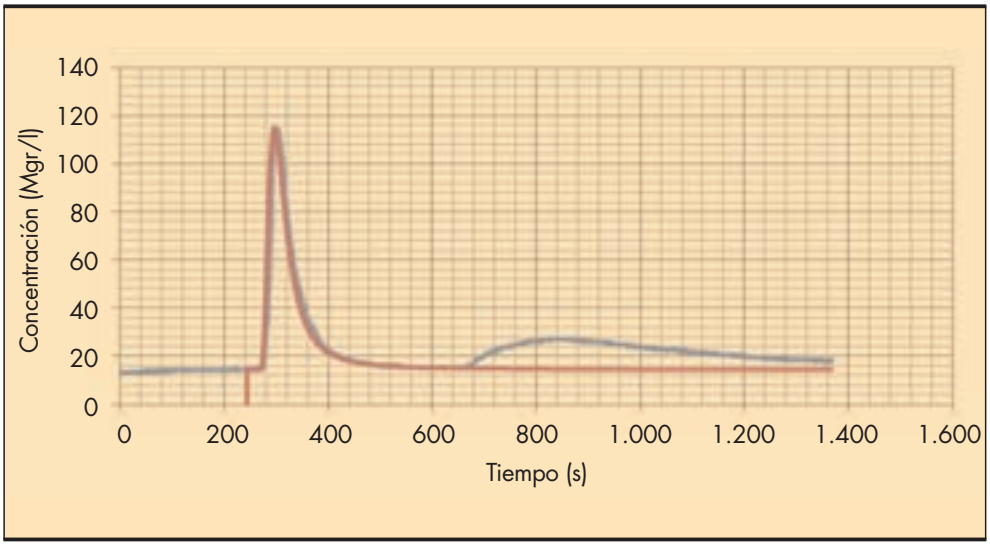



**FIGURA 12A.** Curva 1 a X=10 m. Modelaciones de las tres curvas.

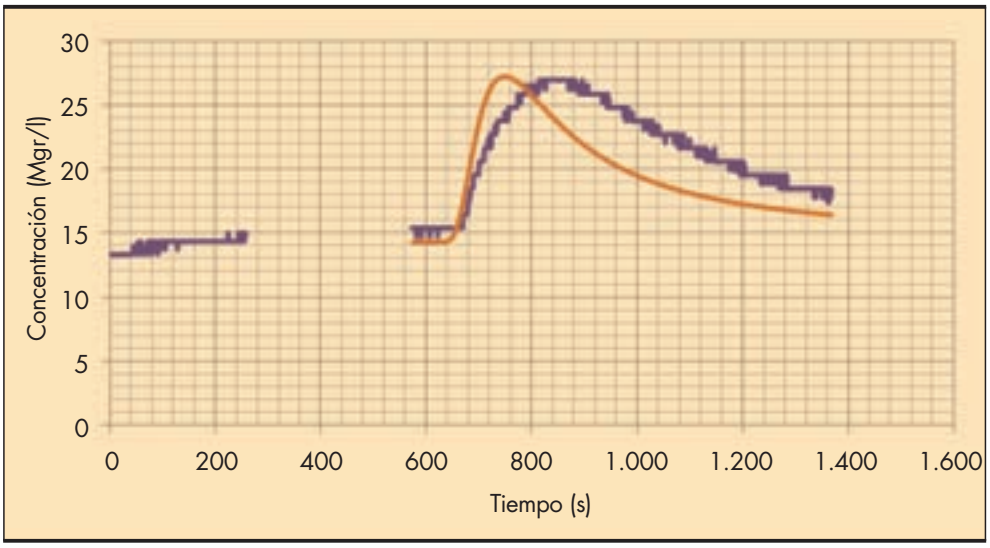



**FIGURA 12B**. Curva 2 a X=20 m. Modelaciones de las tres curvas.

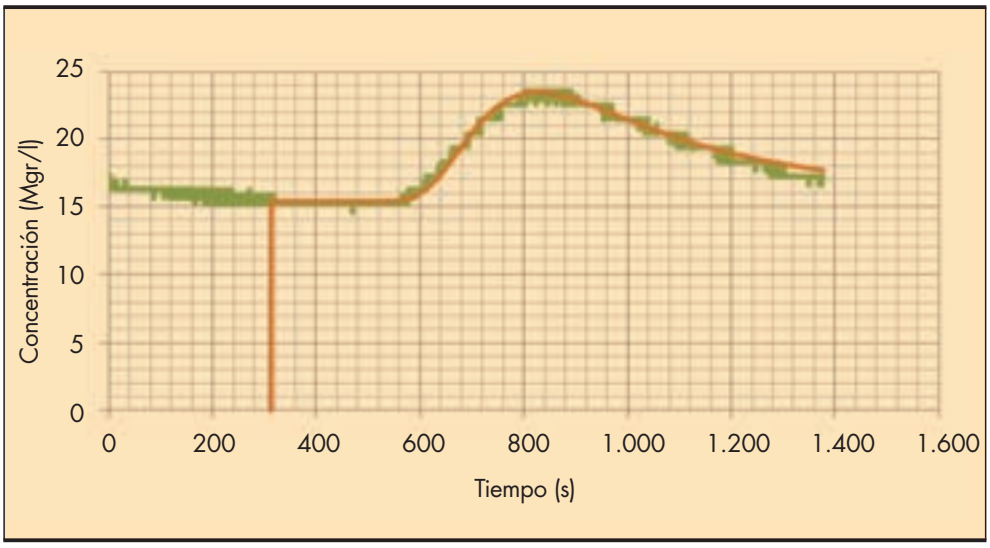



**FIGURA 12C.** Curva 3 a X=40 m, Figura 5. Modelaciones de las tres curvas.

| Distancia | Masa M (Gr) | Velocidad media U (m/s) | Caudal Q ($m^3/s$) | A ($m^2$) | Cp Mgr/l | H (m) | Φ | E ($m^2/s$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X=10 m W=2,90 m Co= 28,1 uS/cm= 13,5 mgr/l, | 136 | 0,173 | 0,0280 | 0,162 | 48,6 | 0,0056 | 0,72 | 0,097 |
| X=20 m (*) W=1,40 m Co= 31,7 uS/cm= 15,2 mgr/l, | 136 | 0,082 | – | – | – | – | – | – |
| X=40 m W=1,80 m Co= 32,0 uS/cm= 15,4 mgr/l, | 116 | 0,068 | 0,030 | 0,441 | 4,02 | 0,245 | 0,88 | 0,254 |
| **Promedio** | **–** | **0,108** | **0,029** | **0,302** | **–** | **0150** | **0,80** | **0,176** |

**TABLA 2.** Datos depurados por la modelación.
*(*)Se eliminan los datos inciertos en la segunda curva.*

exitosas la primera y la tercera. La segunda tiene serios problemas de distorsión por lo que no es apropiada para la modelación. De esta curva se conserva solo el dato de velocidad.

### 5.5. CORRECCIÓN DEL CAUDAL

La disponibilidad de masa efectiva en el experimento se calcula para el Φ promedio de 0.80. Con este dato se corrige el caudal. Figura 13.

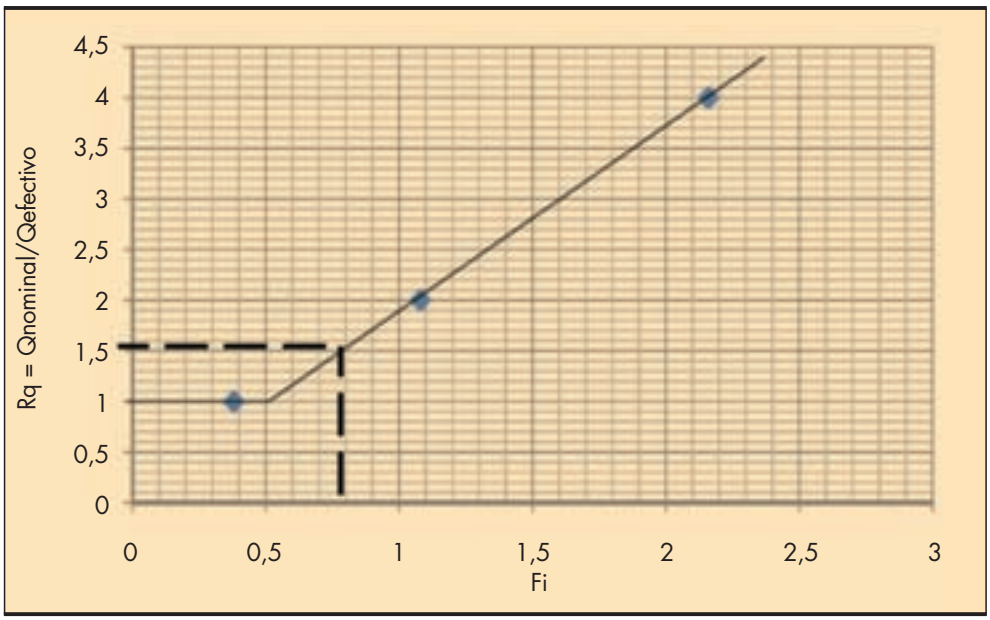



**FIGURA 13.** Corrección de caudal por disponibilidad de masa.

| Velocidad media U (m/s) | Caudal Q ($m^3/s$) | A ($m^2$) | W (m) | H (m) | E ($m^2/s$) | Φ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,108** | **0,0193** | **0,179** | **1,80** | **0,0992** | **0.176** | **0.80** |

**TABLA 3**. Datos consolidados para el tramo.

Para el caso el caudal medido es de 29,0 l/s tiene que ser dividido por 1,5 quedando finalmente un caudal de 19,3 l/s.

Se puede verificar la cercanía del dato obtenido para la profundidad media por trazadores *(H=9,9 cm)* y la estimación geométrica aproximada por batimetría simple (*H=9,2 cm*). Este es un primer valor de la geomorfología determinado en promedio por los trazadores, en seguida se busca los datos restantes.

### 5.6. CÁLCULO APROXIMADO DE LA PENDIENTE Y LA RUGOSIDAD

Se platea un procedimiento de prueba y error, asumiéndose ciertas incertidumbres pues solo se conoce el valor promedio de Φ para las dos distancias. Un procedimiento más preciso es teniendo los datos correspondientes de esta función para cada distancia. Se calcula inicialmente la pendiente con el dato más bajo de *E(X)* hallado con el trazador, manteniendo el dato promedio de profundidad:

**X=10 m:**

$$S \approx \frac{E(10)^2}{35.2 \times h^3 \times g} \approx \frac{0.097^2}{35.2 \times (0.0992)^3 \times 9.81} \approx 0.027$$

Se verifica la "función de estimación", calculando previamente el Radio hidráulico y la constante de Chezy:

$$R \approx \frac{A}{(2 \times h + W)} \approx \frac{0.179}{(2 \times 0.0992 + 1.8)} \approx 0.090$$

$$C \approx \frac{U}{\sqrt{RC}} \approx \frac{0.108}{\sqrt{0.09 \times 0.027}} \approx 2.19$$

Se verifica ahora la "función de estimación" con los valores hallados promedios hallados:

$$F \approx \left( \phi^2 \tau \frac{C^2}{2} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{S}{g\,h}} \right) \approx (0.8)^2 \times (\frac{10}{0.108}) \times 0.215 \times$$

$$\times \frac{2.19^2}{2} \times \frac{0.09}{0.0992} \times \sqrt{\frac{0.027}{9.81 \times 0.0992}} \approx 4.62$$

Este es un valor muy bajo comparado con 5.93. Deben buscarse otros valores que .hagan crecer este resultado hasta ser compatible con la referencia.

Se parte del rango aproximado para *E(X)* extrapolando para valores mayores a *X=10 m*. Por ejemplo a X=30 m en el que se aprecia un nuevo valor para *E≈0.225 m²/s*. Figura 14. Con este nuevo dato se repite el procedimiento aproximado anterior:

**X= 30 m:**

$$S \approx \frac{E(30)^2}{35.2 \times h^3 \times g} \approx \frac{0.225^2}{35.2 \times (0.0992)^3 \times 9.81} \approx 0.150$$

Se tiene el mismo Radio hidráulico que antes: R=0.09 m.

$$C \approx \frac{U}{\sqrt{RC}} \approx \frac{0.108}{\sqrt{0.09 \times 0.150}} \approx 0.93 m^{\frac{1}{2}}/s$$

Se verifica ahora la "función de estimación" con los nuevos valores promedios hallados:

$$F \approx \left( \phi^2 \tau \frac{C^2}{2} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{S}{g\,h}} \right) \approx (0.8)^2 \times (\frac{30}{0.108}) \times 0.215 \times$$

$$\times \frac{0.93^2}{2} \times \frac{0.09}{0.0992} \times \sqrt{\frac{0.015}{9.81 \times 0.0992}} \approx 5,90$$

Este es un valor apropiado para ajustar el Coeficiente de Elder. Se procede a establecer el orden de magnitud de la rugosidad efectiva, según Manning.

$$n \approx \frac{R^{1/6}}{C} \approx \frac{(0.09)^{1/6}}{0.93} \propto 0.7$$

Ciertamente este es un valor extremo del numero de Manning pero debe tenerse en cuenta que la velocidad del flujo es sumamente baja por la gran pérdida de energía en los escalones "piscina-rápido" en el cauce. En apoyo a este valor se tiene la gran congruencia de los datos, ya que la profundidad media calculada con trazadores es bastante cercana al valor promedio obtenido por batimetría simple y que la relación de Chezy arroja el valor correcto de velocidad con los datos obtenidos. El valor de ubicación en el rango para Elder es (0.225 m²/s, 30 m).

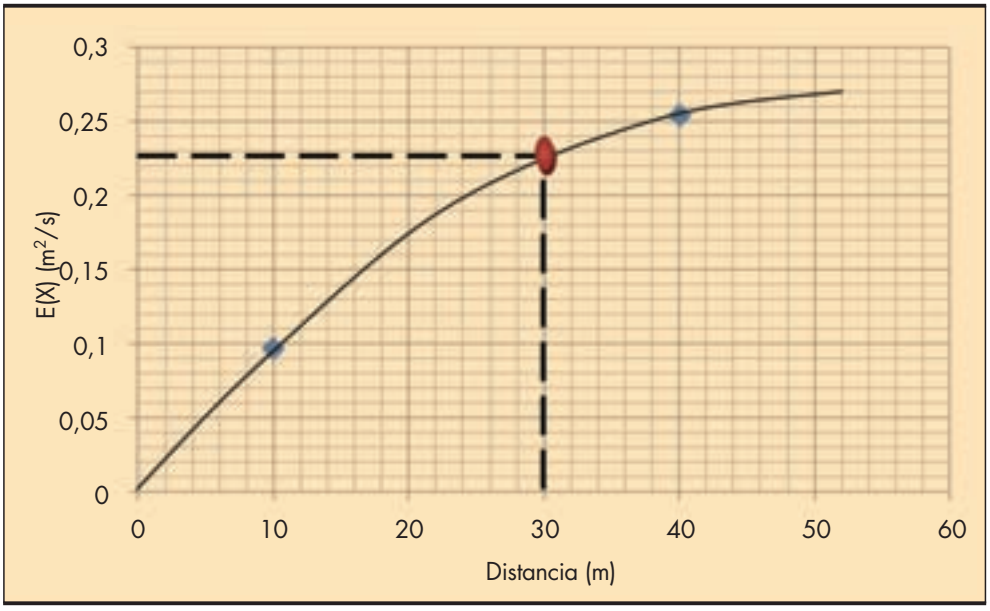



**FIGURA 14.** Tendencia aproximada de E(X).

## 6. CONCLUSIONES

1. Se establecen las condiciones de aplicación óptima del método de trazadores a la Calibración y Validación de los paquetes de Calidad de Agua.
2. La congruencia interna del método presentado asegura una calidad optima de los valores para flujo, transporte y geomorfología.
3. Se aplica el método desarrollado a un rio de montaña en Colombia. Este cauce tiene una velocidad muy baja debido a la gran pérdida de energía por secuencias "piscina-rápido" y consecuentemente una rugosidad ampliada muy grande. Los datos hallados con trazadores se acoplan bien a los datos de la batimetría realizada simultáneamente.
4. Deberán realizarse más experimentos para ajustar el método a diversos tipos de cauce.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Al grupo de Investigación "Visión Colombia hídrica" (reconocido por Colciencias) de la Universidad Militar "Nueva Granada" por su aporte invaluable en la realización de estos experimentos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Constain A, Definición y análisis de una función de evolución de solutos dispersivos en flujos naturales, Revista DYNA (Medellín) No, 175, octubre 2012.

Constain, A. J. y Mesa D. Recovering Elder´s longitudinal dispersion equation by means of a transport coefficient as time function. LACCEI proceedings, Cancun, Mexico, 2013.

Constain A.J.- Aplicación de una ecuación de velocidad media en régimen no uniforme: Analisis detallado del transporte en el canal Caltech usando Excel., Revista Ingeniería Civil, CEDEX, Vol 170 2013.

Elder J,W,, 1959, The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, Journal of fluid mechanics.

Fischer H,B, "Longitudinal dispersion in laboratory and natural channels", PhD Thesis, CALTECH, 1966, Report No, KH-R-12, W, M, Keck Laboratory, California Institute of technology.

Fischer, H,B 1967, The mechanics of dispersion in natural streams, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of ASCE, nov, 187-215.

Fischer, H,B,, 1968, Dispersion predictions in natural streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the ASCE, USA, 927-943.

Fischer, H,B,, 1969, The effects of bends on dispersion in streams, Water resources research, Vol 5, No,2, 496-505.

Mandel J, The statistical analysis of experimental data, Dover, N,Y, 1964.

Gmurman V,E, Problemas de la teoría de probabilidades y de estadística matemática, Editorial Mir, Moscu, 1975.

Martin J.L. & McCutcheon S.C. Hydrodynamics and transport for water quality modeling. Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 1999.

Sierra C.A. Calidad del Agua, Editorial Universidad de Medellín, Colombia, 2011.

Spiridonov V.P. y Lopatkin A.A. tratamiento matematico de datos físico-quimicos. Editorial Mir, Moscu, 1973.

Vélez Upegui J.I, Posada García L., Montoya Cardona M.M y Montoya Martínez E. Metodología para estimar la resistencia al flujo en cauces de montaña. XXI congreso Latinoamericano de Hidraulica, Sao Paulo, Brasil, 2004.

# Evolución de las medidas compensatorias en los procedimientos de evaluación de impacto ambiental

**MARÍA JOSÉ CARRASCO GARCÍA (*), ÁLVARO ENRÍQUEZ DE SALAMANCA SÁNCHEZ-CÁMARA (**), MANUEL R. GARCÍA SÁNCHEZ-COLOMER (***) y SARAH RUIZ ARRIAGA (****)**

**RESUMEN** La aplicación de compensaciones ambientales se ha desarrollado en España desde la implantación de la evaluación de impacto ambiental, aunque ha tenido una verdadera expansión a partir de la promulgación de la Directiva 92/43/CEE, cuando comienza la aplicación de medidas compensatorias por la afección a espacios de la Red Natura 2000. En este estudio se han analizado todas las declaraciones de impacto ambiental emitidas por la Administración General del Estado, desde el inicio del procedimiento hasta finales de 2011, seleccionando aquellas que contemplan compensaciones ambientales, y analizándolas en función del tipo de medidas propuestas y los motivos para su aplicación.

## EVOLUTION OF COMPENSATORY MEASURES IN THE ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT PROCEDURES

**ABSTRACT** *The application of environmental compensation has been developed in Spain since the introduction of environmental impact assessment, although it has been a real expansion since the enactment of Directive 92/43/EEC, when it begins the implementation of compensatory measures for the affection to Natura 2000 areas. In this study all environmental impact statements issued by the Central Government, from the beginning of the procedure until the end of 2011, has been reviewed, selecting those that propose environmental compensation, and analyzing them according to the type of measures proposed and the reasons for application.*

***Palabras clave:*** Medidas compensatorias, Evaluación de impacto ambiental.

***Keywords:*** Compensatory measures, Environmental impact assessment.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de compensación aparece asociado a la evaluación ambiental desde la implantación de este procedimiento. Ya en la Directiva 85/337/CEE, de 27 de junio de 1985, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente, se indica la necesidad de incluir en los estudios *una descripción de las medidas previstas para evitar, reducir y, si fuere posible, compensar los efectos negativos importantes del proyecto sobre el medio ambiente.* Este mismo concepto se recoge en la posterior Directiva 2001/42/CE, de 27 de junio de 2001, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

Estados Unidos y Alemania tienen la experiencia más prolongada en la aplicación de medidas compensatorias, desde la década de 1970, seguidas, más recientemente, por Holanda, Inglaterra y Australia, sobre todo a partir de la década de 1990 (Memon & Skelton, 2004; Rundcrantz & Skärbäck, 2003). En Estados Unidos, a partir de 1983 comenzaron a implantarse bancos de mitigación (*mitigation banks*), para cumplir las compensaciones por pérdida de zonas húmedas establecidas en la *Clean Water Act* (EPA, 2011). En Australia, las compensaciones ambientales son un concepto incorporado a distintas políticas nacionales, como por ejemplo la protección de la vegetación silvestre, el comercio de $CO_2$ o la política forestal. En las décadas de 1980

(*) Licenciada en Ciencias Ambientales e Ingeniera Técnica Forestal. DRABA Ingeniería y Consultoría Medioambiental, S.L. E-mail: mjcarrasco@draba.org
(**) Licenciado en Ciencias Ambientales e Ingeniero Técnico Forestal. DRABA Ingeniería y Consultoría Medioambiental, S.L. E-mail: aenriquez@draba.org
(***) Doctor en Ciencias Biológicas. Área de Ingeniería Ambiental. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. CEDEX. E-mail: manuel.colomer@cedex.es
(****) Licenciada en Ciencias Ambientales. Área de Ingeniería Ambiental. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. CEDEX. E-mail: sarah.ruiz@cedex.es

y 1990, en Australia Occidental se aplicaron compensaciones por la afección a humedales mediante la creación, conservación o mejora de zonas húmedas en otros lugares, pero en los últimos años se ha ampliado el enfoque, utilizando compensaciones para contrarrestar las emisiones o los impactos en zonas protegidas, vegetación, humedales, hábitats y en general a la biodiversidad (ENVIRONMENTAL PROTECTION AUTHORITY, 2006). En ocasiones estas compensaciones no se derivan directamente de la evaluación ambiental, pero en la práctica coinciden con las medidas compensatorias en el ámbito de estos procedimientos.

Las medidas compensatorias son, por tanto, un grupo más de actuaciones ambientales, junto a las medidas preventivas o protectoras y correctoras, cuya aplicación debería ser habitual en la evaluación e integración ambiental. El término inglés *mitigation measures* abarca todos estos tipos de medidas.

La aplicación de compensaciones se ha desarrollado en España desde la implantación de la evaluación de impacto ambiental con el Real Decreto 1302/1986, de 28 de junio, aunque de forma irregular, y principalmente asociadas al patrimonio forestal y pecuario. En otras ocasiones las compensaciones se han empleado en el marco de negociaciones con Administraciones locales, para facilitar acuerdos o lograr una buena aceptación social de los proyectos.

La verdadera expansión en la aplicación de medidas compensatorias tiene su origen en las disposiciones de la Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres (Directiva Hábitats). En su artículo 6, se indica que los planes o proyectos que sin tener relación directa con la gestión de lugares de la Red Natura 2000 puedan afectarlos se someterá a una evaluación de sus repercusiones, y si a pesar de las conclusiones negativas y a falta de soluciones alternativas, debiera realizarse el plan o proyecto por razones imperiosas de interés público de primer orden, el Estado miembro tomará cuantas medidas compensatorias sean necesarias. Esta Directiva marca un punto de inflexión en la aplicación de las medidas compensatorias, al recogerlas como una **obligación**, en los supuestos de afección a la Red Natura 2000, y no solo como algo **deseable**, como ocurría en la Directiva 85/337/CEE. La complejidad en la aplicación de las indicaciones de este artículo, y en la comprensión de algunos términos empleados (entre ellos el propio de medidas compensatorias) ha llevado a la Comisión Europea a publicar varias guías explicativas (COMISION EUROPEA, 2000 y 2007).

A partir de mediados de la década de 1990, comienza la aplicación en España de medidas compensatorias por la afección a espacios de la Red Natura 2000, en cumplimiento del artículo 6 de la Directiva 92/43/CEE. Estas medidas, aunque tienen como objeto una compensación similar a la adoptada para otros aspectos, como las vías pecuarias, tienen la particularidad de estar reguladas por una normativa específica, la Directiva 92/43/CEE y la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, y de requerir una tramitación específica, que puede incluir su comunicación a la Comisión Europea.

Coexisten, en consecuencia, medidas compensatorias derivadas del cumplimiento de la Directiva 92/43/CEE (y la Ley 42/2007), con otras que no tienen relación con la Red Natura 2000. Como solución, en los últimos años se ha optado por denominar **medidas compensatorias** a las asociadas a la Red Natura 2000, y **medidas complementarias** a las que no surgen del cumplimiento de esta norma. Es preciso señalar que se trata de una convención adoptada en España, pero no así en el resto del mundo, ni siquiera en Europa, donde el concepto de medidas compensatorias es mucho más amplio.

La tipología de medidas compensatorias que se han aplicado y se aplican es diversa, incluyendo medidas directas e indirectas, *in-situ* y *ex-situ*, en especie o no en especie. Dentro de estas categorías la variedad de medidas es amplia, y en ocasiones no serían verdaderas medidas compensatorias. Esta es una de las razones por las que la Comisión Europea se vio obligada a aclarar el concepto de medida compensatoria (COMISION EUROPEA, 2007), excluyendo, por ejemplo las medidas habituales requeridas para la protección y la gestión de los lugares Natura 2000.

Entre las medidas compensatorias destacan, tanto por su importancia como por la complejidad para su ejecución, aquellas que implican la adquisición de terrenos, o establecen condiciones específicas para su gestión, lo que implica también, en mayor o menor medida, la disponibilidad de ellos, por adquisición o mediante acuerdos con la propiedad. Este tipo de medidas son fundamentales, porque a menudo las actuaciones de compensación se encaminan a la restauración o mejora de hábitats naturales, o a garantizar la protección de territorios con presencia de hábitats o especies singulares. Esto pasa, necesariamente, por la adquisición o al menos la potestad para la gestión, aunque sea parcial, de terrenos no afectados directamente por el plan o proyecto que da lugar a esas medidas compensatorias.

La práctica en España sobre la aplicación de medidas compensatorias que implican la compra o gestión de terrenos, demuestra la complejidad para llevar a buen término estas actuaciones, por limitaciones físicas (escasez de terrenos), económicas (precios desorbitados de compra), legales (difícil encaje legal de las expropiaciones), dificultades de coordinación entre Administraciones implicadas o por el rechazo de los propietarios, principalmente. Esta problemática podría dar lugar a paralizar la aplicación de las medidas compensatorias propuestas, o a modificaciones en las propuestas iniciales con una finalidad práctica (posibilidad de ejecución) pero no necesariamente con un soporte técnico y científico.

Este estudio se encuadra dentro de los trabajos realizados en el marco de la Encomienda de Gestión firmada entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio se basa en el análisis de todas las declaraciones de impacto ambiental (DIA) emitidas por la Administración General del Estado, desde el inicio del procedimiento de evaluación de impacto ambiental hasta final del año 2011. Entre ellas, se han extractado todas aquellas donde se plantean medidas compensatorias, entendidas de una forma amplia, es decir, cualquier tipo de compensación social o ambiental. Tras analizar una a una todas las declaraciones de impacto ambiental publicadas, se han seleccionado las 197 que presentan algún tipo de compensación.

Se pretende recopilar de forma sistemática todas las compensaciones ambientales planteadas en procedimientos de evaluación de impacto ambiental competencia de la Administración General del Estado, lo que permite analizar la evolución en la aplicación de este tipo de medidas, los casos o tipos de proyectos que habitualmente las llevan asociadas, y la proporción de compensaciones que se aplica por la afección significativa a la Red Natura 2000 o por otras causas.

Para cada DIA con algún tipo de medida de compensación, se ha realizado una ficha individual, donde se recoge la siguiente información:

- Datos del proyecto (título, tipo, ubicación, promotor, órgano sustantivo).
- Datos de la declaración de impacto ambiental (resolución, número del Boletín Oficial del Estado (BOE) y fecha).
- Causas de la adopción de compensaciones ambientales en sentido amplio, indicando si se derivan o no de la afección a espacios de la Red Natura 2000 y si es significativa.
- Valores naturales que motivan la adopción de las medidas compensatorias, cuando se explicitan.
- Medidas propuestas distinguiendo las que implican de forma directa la compra o gestión de territorio, las que lo implican de forma indirecta y otras.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. EVOLUCIÓN GENERAL DE LA APLICACIÓN DE MEDIDAS COMPENSATORIAS

La evaluación de impacto ambiental se incorporó al marco jurídico español mediante el Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental (actualmente derogado, estando vigente el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, modificado por la Ley 6/2010, de 24 de marzo) desarrollado mediante el Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba su Reglamento.

La primera DIA se publica en el BOE de 2 de septiembre de 1989. La primera referencia a una compensación ambiental aparece en una DIA publicada en el BOE de 17 de febrero de 1990, sobre una autovía, y los motivos de compensación, poco definidos, son socioeconómicos, por productividad de los suelos.

En estas primeras DIA es frecuente la aparición de compensaciones de tipo socioeconómico. Sin embargo, en la DIA de la presa de Itoiz (BOE 06-09-1990), la tercera registrada con algún tipo de compensación, ya se proponen medidas de compensación ambiental, como la restauración de las riberas de dos ríos (no el afectado) y la construcción de frezaderos artificiales.

La primera compensación ambiental que tiene asociada la adquisición de terrenos aparece en la DIA de la conexión de la carretera N-I con la N-VI en Madrid, la autovía M-40 (BOE 18-01-1991), donde se plantea estudiar la posibilidad de incorporar al Monte de El Pardo una superficie de terreno colindante equivalente a la aislada por el trazado de la autovía, como compensación a la ocupación de terrenos, medida que se ratifica en otra DIA posterior (04-02-1994).

Pese a estos dos casos singulares, Itoiz y El Pardo, hasta comienzos del año 1994 lo habitual es que las compensaciones sean por aspectos socioeconómicos.

A partir de febrero de 1994, las compensaciones pasan a ser principalmente ambientales, en general derivadas de la afección a vegetación singular o a especies de fauna amenazadas.

La primera compensación asociada a la Red Natura 2000 aparece en 1995, en la DIA de la autopista R-2, entre Madrid y Guadalajara (BOE 07-04-1995), modificada cuatro años después. En ella se establece una compensación superficial, y se emplaza al promotor a documentar las razones imperiosas de interés público de primer orden, incluidas razones de índole social o económica del proyecto. Es por tanto un caso claro de aplicación del artículo 6.4 de la Directiva 92/43/CEE.

En los siguientes años comienzan a proponerse medidas compensatorias, sobre todo en proyectos que afectaban a la Red Natura 2000, pero sin entrar a definir si la afección era significativa. La sola afección a un espacio Natura 2000 daba lugar a la aplicación de medidas compensatorias, creando notable confusión sobre si la compensación se aplicaba por asumirse una afección significativa a los espacios de Red Natura 2000 afectados, y en consecuencia se adoptaban en cumplimiento del artículo 6.4 de la Directiva Hábitats, o si se aplicaban con carácter general.

Esta situación, unida a la propuesta en muchos países miembros de la Unión de medidas compensatorias que muy dudosamente compensaban la afección a la Red Natura 2000, llevó a la Comisión Europea a publicar varios documentos explicativos sobre el alcance del artículo 6.4 de la Directiva Hábitats, entre los años 2000 y 2007, donde se acota la necesidad de estas medidas a las afecciones significativas sobre la Red Natura 2000, y se detallan los requisitos que deben cumplir estas medidas.

A partir del año 2003 empiezan a aparecer declaraciones de impacto ambiental donde se emplean los conceptos "medidas complementarias" o "medidas adicionales", para referirse en general a aquellas medidas compensatorias que no se aplicaban en cumplimiento del artículo 6.4 de la Directiva Hábitats.

Pese a que el empleo de esos términos, en general confusos, se ha generalizado, ocasionalmente sigue hablándose de medidas compensatorias, aunque no necesariamente asociadas a la Red Natura 2000.

En los últimos años, se detectan varios aspectos importantes:

- Los aspectos formales y procedimentales en la aplicación de medidas compensatorias en cumplimiento del artículo 6.4 de la Directiva Hábitats son más claros, evitando las incertidumbres e indefiniciones. Siempre que se afecta un espacio de Red Natura 2000 se solicita informe al órgano ambiental autonómico, sobre si los impactos son significativos, y si son precisas medidas compensatorias.
- Cada vez más las medidas compensatorias se van asociando al cumplimiento del artículo 6.4 de la Directiva Hábitats, o a exigencias de los órganos ambientales autonómicos en casos de afección a la Red Natura 2000.
- Parece existir una tendencia a reducir las medidas compensatorias, por quedar asociadas al artículo 6.4 de la Directiva. Aunque esa norma marca un supuesto donde la aplicación de medidas compensatorias es obligada, no es el único supuesto donde pueden adoptarse. Es decir, que las medidas compensatorias sean obligatorias en caso de que la afección a la Red Natura 2000 sea significativa no debe llevar a que solo se apliquen en ese caso.

En los últimos años se observan numerosas actuaciones (carreteras, ferrocarriles, líneas eléctricas, gasoductos, etc.) que tienen asociados pequeños impactos en la Red Natura 2000, y que por no considerarse significativos, no se aplican compensaciones. Si se analiza de forma acumulativa, supone una considerable pérdida de hábitats dentro de la Red Natura 2000.

También son numerosos los proyectos con impactos sobre hábitats de interés comunitario, o sobre hábitats de especies de interés, fuera de la Red Natura 2000. Salvo algún caso excepcional, lo habitual es que no existan compensaciones. Si se calcula el impacto residual acumulado de todos estos proyectos, la pérdida de biodiversidad es muy significativa.

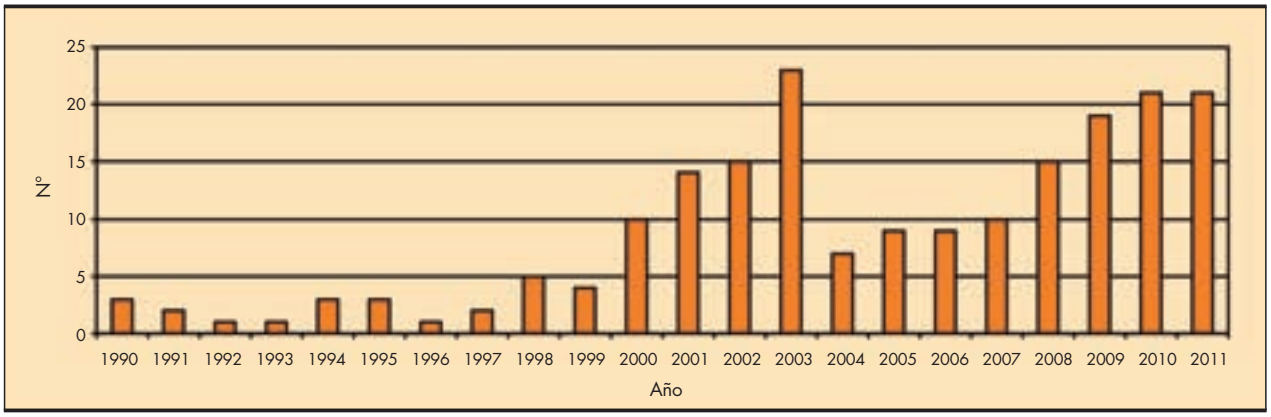



**FIGURA 1.** Número de declaraciones de impacto ambiental con alguna medida de compensación por años.

### 3.1. EVOLUCIÓN ANUAL

El primer resultado estadístico del análisis de las declaraciones de impacto ambiental es la evolución total a lo largo de los años, desde la primera compensación ambiental recogida, en 1990, hasta diciembre de 2011, es decir, el número de declaraciones anuales con algún tipo de compensación.

En la Figura 1 se recoge el número total de declaraciones de impacto ambiental por años. Se observa una tendencia más o menos estable hasta 1999, pasando a crecer fuertemente hasta 2003, cuando sufre una caída, seguida de una recuperación paulatina.

El número total de declaraciones de impacto ambiental que contemplan compensaciones es un dato muy relativo, ya que depende del total de resoluciones emitidas cada año. En la Figura 2 se han relacionado ambos factores, expresando el porcentaje anual de declaraciones de impacto ambiental con algún tipo de compensación. Aunque los resultados tienen cierta similitud a la Figura 1, existe un periodo importante entre 1998 y 2003 (los años 1990 y 1991 son poco significativos por el escaso número anual de resoluciones), coincide la caída en 2004, y también la actual recuperación.

### 3.2. DISTRIBUCIÓN REGIONAL

Un segundo análisis estadístico interesante es la distribución de las declaraciones de impacto ambiental con algún tipo de compensación ambiental por comunidades autónomas. Los resultados se recogen en la Figura 3. Cuando un proyecto afecta a más de una comunidad autónoma, se contabiliza en todas ellas.

Las compensaciones ambientales recogidas no están necesariamente asociadas a la afección a la Red Natura 2000. Lo cierto es que la consideración de medidas compensatorias dentro del alcance del artículo 6.4 de la Directiva 92/43/CE, implica que el Estado miembro informará a la Comisión de las medidas compensatorias, de las alternativas consideradas y de las razones imperiosas de interés público de primer orden. Esto da lugar a un considerable alargamiento del procedimiento de evaluación ambiental.

Teniendo en cuenta esto, para valorar de forma general la distribución regional de las compensaciones, se ha comparado con la distribución superficial de la Red Natura 2000 en las comunidades autónomas, recogida en la Figura 4.

A partir de la Figura 3 se comprueba que hay siete comunidades autónomas que acumulan el 78,2 % de las DIA con medidas compensatorias frente a nueve comunidades que acumulan el 21,8 %. Por tanto, se observa un desequilibrio territorial en la aplicación de las compensaciones ambientales.

Puesto que hay una relación directa entre el número de procedimientos ambientales y la superficie y población de las comunidades autónomas (Barbero y Tiscar, 2010), se contrasta si este desequilibrio es debido a que las comunidades de mayor extensión son las que acumulan el mayor número de DIA con medidas compensatorias.

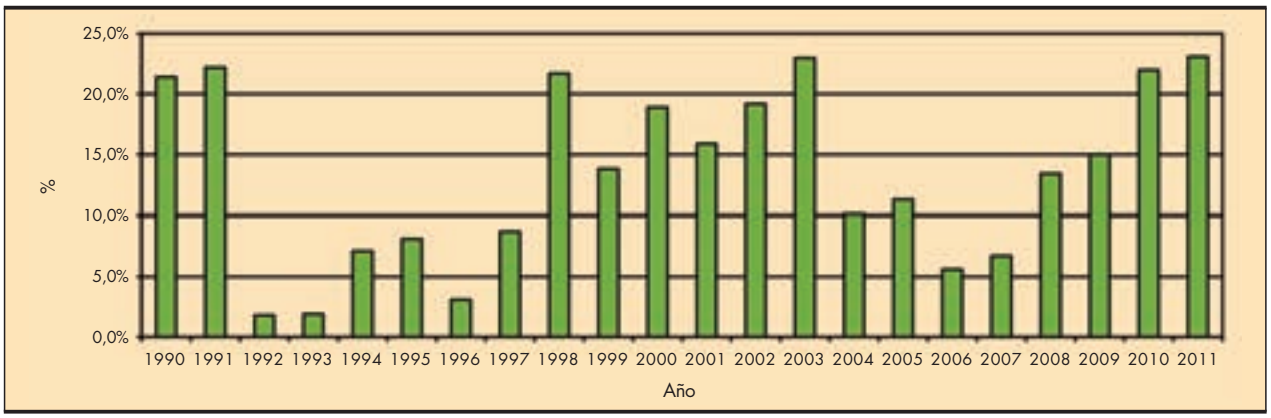



**FIGURA 2.** Porcentaje de declaraciones de impacto ambiental con alguna medida de compensación por años.

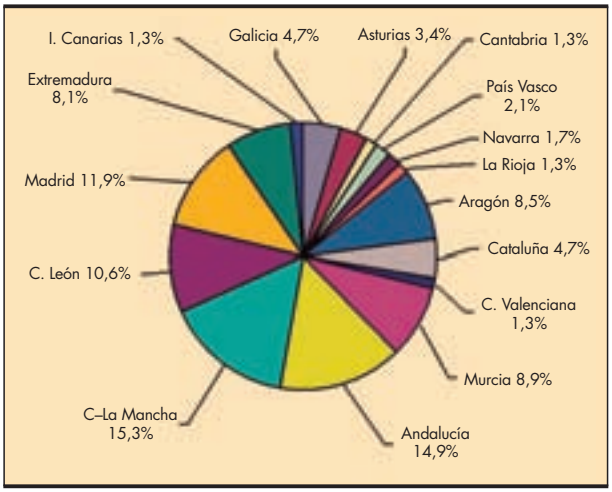



**FIGURA 3.** Porcentaje de declaraciones de impacto ambiental con medidas de compensación por Comunidades Autónomas.

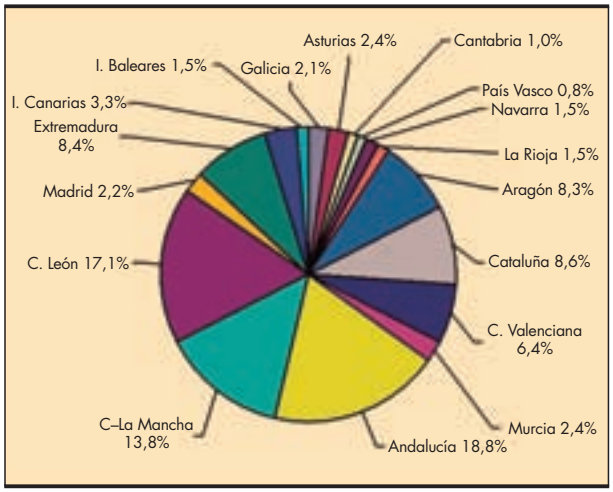



**FIGURA 4.** Porcentaje de superficie de la Red Natura 2000 por Comunidades Autónomas.

En las Figuras 3 y 4 se observa que la correspondencia entre el número de DIA con medidas compensatorias y la superficie se verifica en un número elevado de comunidades autónomas. Sin embargo, hay comunidades autónomas con menor contribución a la Red Natura 2000 y un alto porcentaje de DIA con medidas compensatorias (por ejemplo, Madrid y Murcia). Otras comunidades presentan un número relativamente bajo de DIA con medidas compensatorias frente a la superficie incluida dentro de Red Natura 2000 (por ejemplo, Comunidad Valenciana y Cataluña).

Se puede concluir, de forma general, que parece existir un desequilibrio territorial en la aplicación de las compensaciones ambientales.

### 3.3. DISTRIBUCIÓN POR TIPO DE PROYECTOS

Otro análisis interesante es la distribución de las declaraciones de impacto ambiental con medidas de compensación por tipología de proyectos evaluados. En la Figura 5 se resumen los resultados obtenidos.

Existe una dominancia clara de medidas de compensación en los proyectos de carreteras, en sentido amplio, y sobre todo en autovías y autopistas, con más de una tercera parte del total de casos. Aunque si bien es cierto que el número de proyectos de carreteras es muy elevado en el periodo de estudio, también parece que a igualdad de afecciones, la probabilidad de aplicar medidas de compensación en estas infraestructuras es mayor. La tendencia ha sido decreciente en el tiempo, como la propia construcción de carreteras.

En los ferrocarriles la tendencia es opuesta, creciente en el tiempo, aunque el total de declaraciones con compensaciones se queda en el 14%.

Los aeropuertos y aeródromos suponen el 8%, pero considerando el reducido número de proyectos de este tipo, la frecuencia con que se plantean medidas de compensación es muy elevada.

Los proyectos de puertos son escasos, y también la propuesta de compensaciones, con un 2% de los casos.

Las obras hidráulicas, con un 18% de los casos, ocupan el segundo lugar, lógico por el número de proyectos y por tener a menudo asociadas importantes ocupaciones e impactos apreciables.

En el caso de la energía, las compensaciones propuestas, un 13% de casos, es muy inferior al número de proyectos evaluados. Destacan las líneas eléctricas, con casi un 7% de las propuestas de compensación.

El resto de tipologías son menos representativas, aunque pueden destacarse los regadíos, con el 4% de los casos, y la depuración y desalación, con un 3% dividido a partes iguales entre ambos tipos de proyecto.

En los últimos años detecta el elevado número de proyectos de energía, sobre todo líneas eléctricas pero también gasoductos, que pese a cruzar espacios de la Red Natura 2000 no incluyen ninguna medida de compensación, al considerar que la afección es poco significativa.

Con carácter general, puede afirmarse que a igualdad de afecciones, sobre todo sobre un espacio Natura 2000, es más probable que se plantee durante la evaluación ambiental algún tipo de compensación ambiental en una infraestructura de transporte que en un proyecto de transporte de energía.

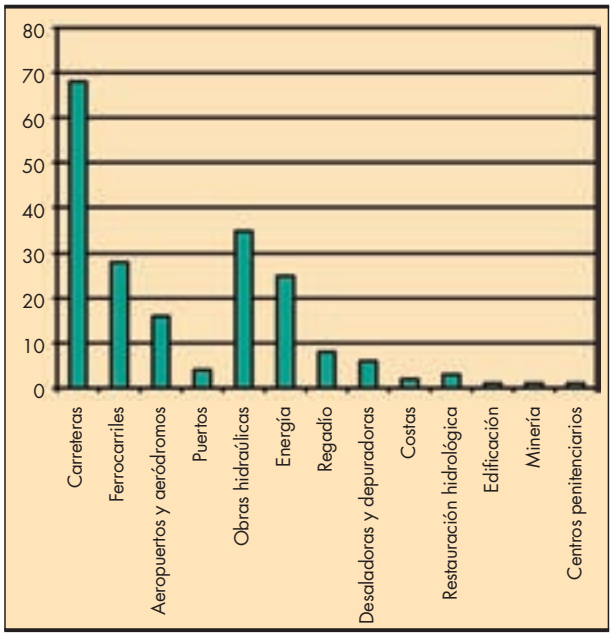



**FIGURA 5.** Número de declaraciones de impacto ambiental con medidas de compensación por tipos de proyecto.

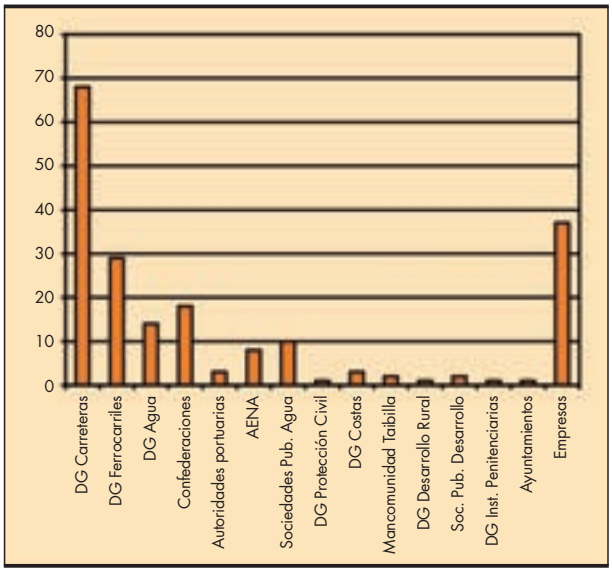



**FIGURA 6.** Número de declaraciones de impacto ambiental con medidas de compensación por promotor.

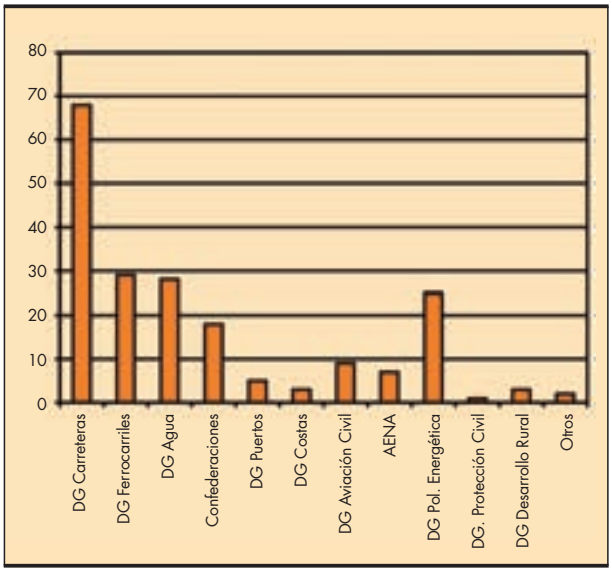



**FIGURA 7.** Número de declaraciones de impacto ambiental con medidas de compensación por órgano sustantivo.

### 3.4. DISTRIBUCIÓN POR PROMOTOR

En la Figura 6 se resumen las declaraciones analizadas según los promotores.

La Dirección General de Carreteras es el promotor de la mayoría de las DIA con medidas de compensación seguida, a cierta distancia, por empresas, donde destacan las del sector energético, sobre todo Enagas y Red Eléctrica de España. Son destacables también como promotores la Dirección General de Ferrocarriles y la Dirección General del Agua y Confederaciones, a los que se sumarían además la Mancomunidad de Canales del Taibilla y las sociedades públicas creadas para la gestión del agua.

### 3.5. DISTRIBUCIÓN POR ÓRGANO SUSTANTIVO

En la Figura 7 se resumen las declaraciones analizadas según los órganos sustantivos, es decir, los competentes en la autorización de los proyectos.

Es preciso destacar que en la mayor parte de obras públicas coincide el promotor y el órgano sustantivo, como es el caso de las Direcciones Generales de Carreteras y Ferrocarriles. En otros casos, como la gestión del agua puede variar el órgano sustantivo.

### 3.6. COMPENSACIÓN EN LA RED NATURA 2000

En los primeros años analizados, la compensación no tiene ninguna relación con la Red Natura 2000, aún inexistente, pero a partir de la aprobación de la Directiva 92/43/CEE, cada vez la relación va siendo más fuerte.

En una primera etapa, se proponen medidas de compensación ambiental siempre que se afecta un espacio de la Red Natura 2000, con independencia de la importancia de los efectos. Posteriormente, se hace una aplicación más rigurosa del artículo 6.4 de la Directiva, aplicando solo medidas compensatorias cuando la afección al espacio es significativa, aunque es frecuente que se sigan planteando compensaciones ambientales, con diferentes nombres, como medidas complementarias o adicionales.

Los casos en que se reconoce explícitamente que se aplican medidas compensatorias por afección a la Red Natura 2000 son escasos, aunque en la práctica lo más frecuente es que las compensaciones se deriven precisamente de esa afección, aunque no se indique de forma explícita. En la Figura 8 se resumen la relación de las medidas propuestas con la Red Natura 2000.

Poco más de la mitad de los casos en que se plantean compensaciones ambientales están relacionados con la Red Natura 2000.

Un aspecto interesante es si esas compensaciones se aplican por afección significativa a los espacios Natura 2000, es decir, sin son medidas compensatorias en el sentido estricto del artículo 6.4 de la Directiva 92/43/CEE, o no. Con frecuencia en la evaluación ambiental no queda claramente expuesto si la afección se considera significativa, al menos en las resoluciones más antiguas, ya que actualmente sí se tiende a explicitar.

En la Figura 9 se resumen la forma de afección a la Red Natura 2000 que parece desprenderse de las declaraciones de impacto ambiental, pero que no tiene por qué estar explícitamente indicado.

En un tercio de los casos parece que la afección es significativa, por el tipo de impactos citados y por las medidas compensatorias propuestas, aunque no queda muy claro en un 11% de los casos. Es destacable el gran número de casos en

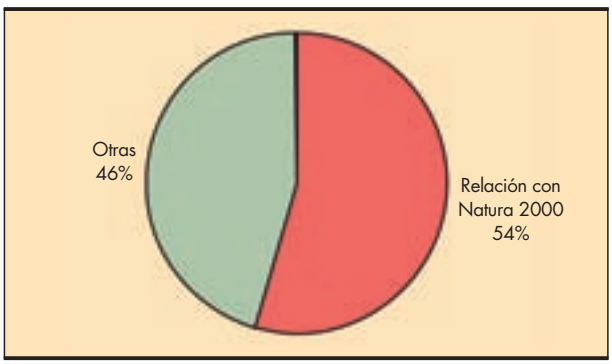



**FIGURA 8.** Relación de las compensaciones propuestas con la Red Natura 2000.

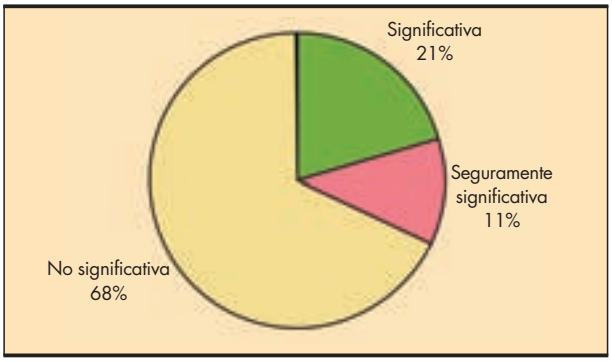



**FIGURA 9.** Relación de las compensaciones propuestas en la Red Natura 2000 con la importancia de las afecciones.

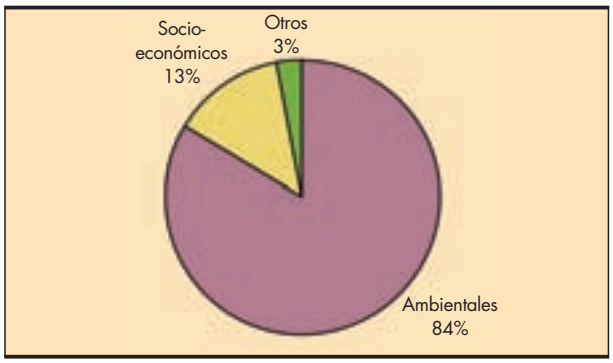



**FIGURA 10.** Motivos de las compensaciones propuestas fuera de la Red Natura 2000.

que no se reconocen impactos significativos pero se aplican compensaciones ambientales.

La mayor parte de impactos significativos está en los proyectos más antiguos, cuando se hacía una interpretación más amplia de la Directiva 92/43/CEE, considerando que cualquier efecto sobre la Red Natura 2000 debía dar lugar a la aplicación de medidas compensatorias. Sin embargo, en los últimos años se hace una aplicación más estricta, y por ello más restrictiva, valorando en cada caso si los efectos son o no significativos, y proponiendo medidas compensatorias únicamente cuando lo son. En la mayor parte de los proyectos, los promotores consideran que los impactos no son significativos, y por lo general las comunidades autónomas refrendan esa opinión, y en consecuencia no se proponen medidas compensatorias.

### 3.7. COMPENSACIÓN FUERA DE LA RED NATURA 2000

En las medidas de compensación no derivadas de afecciones a la Red Natura 2000, lo más habitual es que los motivos sean ambientales, resultando mucho menos frecuentes los motivos socioeconómicos, comunes en los primeros expedientes analizados, u otros como los recreativos o culturales (Figura 10).

### 3.8. JUSTIFICACIÓN DE LA COMPENSACIÓN

Un aspecto interesante a evaluar es la justificación de las compensaciones propuestas. En casi el 16% de los casos no se recoge ninguna justificación o motivación para la aplicación de las compensaciones propuestas (Figura 11).

Con respecto a las justificaciones aportadas en las DIA, se recogen en la Figura 12. Destaca claramente como argumento aportado en la compensación la afección a un espacio natural, en general un espacio Natura 2000, aunque también otro tipo de espacios protegidos, catalogados o inventariados. A menudo la afección a esos espacios se alega como única justificación de la compensación, sin citar las especies de flora o fauna, hábitats u otros valores concretos afectados, o lo que realmente se quiere compensar.

Sigue en importancia la compensación por afección a vegetación y hábitats de interés comunitario, aspectos muy ligados y que no es posible diferenciar. En las resoluciones más antiguas es frecuente la compensación por afección a vegetación singular, sobre todo bosques y vegetación de ribera, existiendo una tendencia creciente con el tiempo a compensar solo afecciones a hábitats de interés comunitario.

Las compensaciones por afección a especies de fauna son también importantes, mientras que las asociadas a especies de flora son mucho menos representativas, al menos de forma explícita, ya que de forma implícita se incluyen en la vegetación y hábitats.

Las causas socioeconómicas son escasas, y sobre todo se dan en las declaraciones más antiguas, compensando ocupaciones de suelos productivos.

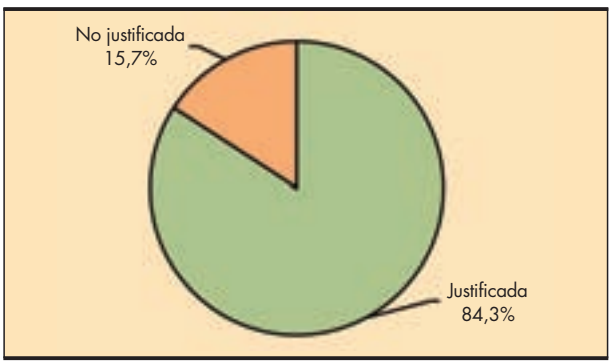



**FIGURA 11.** Justificación de las compensaciones en las declaraciones de impacto ambiental.

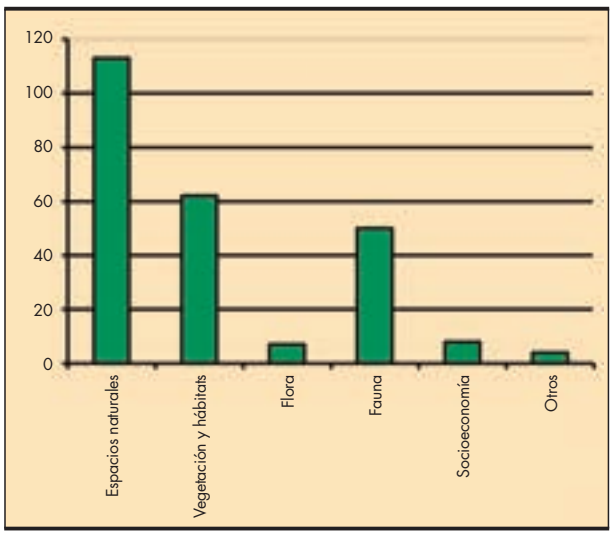



**FIGURA 12.** Tipo de justificación de las compensaciones.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios realizados por la Comisión Europea han detectado una pérdida neta de biodiversidad en la Unión Europea, sobre todo por afección a hábitats y especies fuera de la Red Natura 2000, planteando la conveniencia de extender las compensaciones ambientales más allá de los concretos requerimientos del artículo 6.4 de la Directiva.

Sin embargo, el temor a que el planteamiento de una compensación ambiental, sea cual sea su nombre, se asocie a una afección significativa a la Red Natura 2000 está llevando en los últimos años a una menor adopción de este tipo de medidas, incluso en casos donde se afectan hábitats de interés comunitario, incluidos los prioritarios, dentro o fuera de la Red Natura 2000, situaciones en las que sería realmente deseable una compensación, para evitar con carácter general la pérdida neta de biodiversidad.

De hecho, en bastantes proyectos los promotores consideran que los impactos no son significativos, en ocasiones de forma cuanto menos discutible, para evitar así aplicar medidas compensatorias.

Además, en las resoluciones más antiguas era frecuente la compensación por afección a vegetación singular, sobre todo bosques y vegetación de ribera, pero en la actualidad la tendencia es a compensar solo las afecciones a hábitats de interés comunitario.

Existe un claro riesgo de pérdida de biodiversidad por la acumulación de pequeños impactos. Aunque los efectos de un proyecto no sean ciertamente significativos, la suma de sucesivos proyectos puede ir produciendo una gradual pérdida de hábitats. La aplicación de compensaciones con carácter general, fuera del marco del artículo 6.4 de la Directiva Hábitats, podría evitar este efecto indeseable.

En consecuencia, ese recelo que se está asentando en España hacia el concepto de compensación ambiental, puede llevar a una tendencia contraria a la existente en el resto del mundo, y a las recomendaciones de la Comisión Europea para evitar la pérdida de biodiversidad en la Unión Europea. La solución a este problema pasa por una regulación, o una explicación clara, de la compensación ambiental, y porque existan posibilidades, y se apliquen, de compensación fuera de los requisitos del artículo 6.4 de la Directiva 92/43/CEE.

Un segundo aspecto son las importantes diferencias detectadas a la hora de aplicar compensaciones ambientales según comunidades autónomas y tipos de proyectos, e incluso entre proyectos similares y en un mismo territorio. Mientras algunos proyectos establecen compensaciones por la afección a hábitats fuera de la Red Natura 2000, en otros no se compensan aunque sean prioritarios y estén dentro de la Red Natura 2000, por considerar que la afección no es significativa. También, cuando se compensa algún recurso, las ratios de compensación son muy variables, incluso para el mismo tipo de recurso, y el mismo tipo de proyecto.

Por tanto, existe un posible riesgo de desequilibrio territorial y sectorial en la política de compensaciones. Territorial, por aplicarse compensaciones de forma más habitual en unas regiones que en otras, y sectorial por ser más estrictos los requisitos para unos tipos de obras que para otros, aunque tengan impactos comunes. Para una misma región y un mismo tipo de afección, en unos casos se ha aplicado compensación y en otros no.

De todas estas conclusiones, se derivan una serie de recomendaciones generales, para mejorar la aplicación de las compensaciones ambientales:

- Aclarar el concepto de compensación ambiental y su alcance, diferenciando cuándo se aplica de forma preceptiva y cuándo no. Se debe evitar la actual tendencia a limitar las compensaciones al cumplimiento del artículo 6.4 de la Directiva 92/43/CEE, con una tendencia contraria a la que se está siguiendo en la mayor parte del mundo, donde se tiende a generalizar la compensación ambiental. Sánchez Guisández (2010) propone llamar "medidas compensatorias Natura 2000" a las aplicadas en cumplimiento de la Directiva, para diferenciarlas del resto. Pero esa diferenciación no debe llevar a suprimir las compensaciones ambientales que no se apliquen por este motivo.
- Procurar que se haga una aplicación más generosa de la compensación ambiental, fuera de las estrictas exigencias de la Directiva 92/43/CEE, para evitar que pequeños impactos residuales, que actúan de forma acumulativa, terminen por generar una importante pérdida neta de biodiversidad. Un primer paso podría ser la compensación de toda afección a hábitats y especies de interés comunitario.
- Establecer unos criterios generales sobre cuándo deben aplicarse compensaciones, para evitar desviaciones regionales o sectoriales. Sería deseable que se aplicasen en todas las Administraciones, pero al menos debería intentarse una homogeneidad en la Administración General del Estado.
- Proponer criterios y ratios de compensación, aunque sea de forma flexible y aproximada, para evitar las grandes disparidades que se producen.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


Barbero, J. & Espigares, T. (2010). Aplicación de la evaluación de impacto ambiental en España en el periodo 1989-2008: El caso de los proyectos de carreteras. *Ingeniería Civil* 157: 57-67.

Comision Europea (2000). *Gestión de espacios Natura 2000. Disposiciones del artículo 6 de la Directiva 92/43/CEE sobre hábitats.* Comisión Europea.

Comision Europea (2007). *Documento orientativo sobre el apartado 4 del artículo 6 de la "Directiva sobre hábitats" 92/43/CEE. Clarificación de los conceptos de soluciones alternativas, razones imperiosas de interés público de primer orden, medidas compensatorias, coherencia global y dictamen de la Comisión.* Comisión Europea.

Environmental Protection Authority (2006). *Environmental offsets. Position Statement 9.* <http://edit.epa.wa.gov.au> Government of Western Australia.

EPA (2011). *Mitigation Banking Factsheet*. U.S. Environmental Protection Agency. <www.epa.gov/owow/wetlands/facts/fact16.html>.

Madsen, B., N. Carroll & K. Moore Brands (2010). *State of biodiversity markets report: offset and compensation programs worldwide.* <www.ecosystemmarketplace. com>.

Memon, A. & P. Skelton (2004). *The practice of environmental compensation under the Resource Management Act 1991: A comparison with international experience.* Resource Management Law Association of New Zealand <www.rmla.org.nz>.

Rundcrantz, K. & E. Skärbäck (2003). Environmental compensation in planning: a review of five different countries with major emphasis on the german system. *European Environment* 13: 204-226.

Sanchez Guisandez, M. (2010). Medidas compensatorias en el marco de la Directiva Hábitats. *Jornadas sobre medidas compensatorias de proyectos de infraestructuras viarias que afectan a la Red Natura 2000.* Gijón 18 y 19 de noviembre de 2010.

# Análisis de ensayos de carga en pilotes de gran diámetro en Polonia y propuesta de correlaciones a utilizar para el cálculo de capacidades portantes

**JUAN-ALFONSO CARCOLÉ GALEA (*) y ANA MARÍA AGUILAR BAUZA (**)**

**RESUMEN** En este documento se analiza los ensayos de carga estática en pilotes de gran diámetro ejecutados en materiales glaciares en Polonia. Los ensayos fueron realizados para el consorcio DRAGADOS, S.A. y POLAQUA, S.A. adjudicatario de la obra "CONSTRUCCIÓN DE LA AUTOVÍA S8 EN EL TRAMO NUDO WALICHNOWY NUDO WROCŁAW (A1), TRAMO 5 (NUDO SIERADZ POŁUDNIE SIN NUDO – NUDO ŁASK SIN NUDO) DEL PK 140+552,05 AL PK 174+200,00".(POLONIA). El presupuesto de la obra asciende a 1.388.898.322,99 PLN (unos 347 millones €), destinados a la construcción de 34 Km de autovía.

## ESTATIC PENETRATION IN POLSKA GLACIAR GROUNDS. CORRELATIONS PROPOSED TO USE IN THE CALCULATION OF THE PILES BEARING CAPACITY

**ABSTRACT** *In this document, we discuss the loading test used on piles drilled in glaciers grounds. This Tests was made for the consortium Dragados, SA and POLAQUA, S.A. awarded the construction "S8 HIGHWAY CONSTRUCTION IN STRETCH KNOT KNOT Walichnowy WROCLAW (A1), SECTION 5 (KNOT SIERADZ KNOTLESS poludnie - KNOTLESS Lask KNOT) OF THE PK PK 174 140 +552,05 +200,00" (POLAND). The cost of the project is 1,388,898,322.99 PLN. (approximately 347 million €), for the construction of 34 Km of motorway.*

***Palabras clave:*** "Carga estática", Pilotes de gran diámetro, "Glinas".

***Keywords:*** "Loading Test", Piles, "Glinas".

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de ensayos de carga estática y de integridad en pilotes está ampliamente extendido en Polonia.

En todas las estructuras que se ejecutan en el ámbito civil debe realizarse un mínimo de un ensayo por encepado.

Desafortunadamente todos los ensayos analizados en este artículo son de comprobación/aceptación/investigación y no de diseño, por lo que no llegan al hundimiento de los pilotes. Por ello se discutirá los diferentes métodos de análisis y se hará la comparación entre el análisis del "método polaco" y los habitualmente usados en otros países del ámbito anglosajón y en la literatura habitual de este tipo de ensayos.

Todos los datos utilizados en el presente estudio pertenecen a la construcción de la autovía S-8, adjudicada al consorcio DRAGADOS, S.A. - POLAQUA, S.A. Se trata de un tramo de 34 km de autovía con dos carriles por sentido y una mediana de 11 m., sobre un firme rígido de hormigón y con 33 estructuras, donde destacan los viaductos sobre los ríos Warta y Grabia, de 947 y 838 m. respectivamente. La superestructura se caracteriza por los más de 190.000 $m^2$ de pantallas acústicas. El terreno tiene tratamientos de mejora realizados con jet grouting y con más de 200.000 m.l. de columnas de grava-cemento.

Los pilotes aquí analizados se han ejecutado en las denominadas "glinas", que son **arenas arcillosas (SC) y limos arenosos (ML y ML-CL)** sobreconsolidados.

(*) Ingeniero geólogo por la Universidad de Barcelona y Universidad Politécnica de Cataluña. Empresa de geotecnia IGPS SL. Asesor geotécnico S-8 tramos 5.1, 5.2, 6 y 7 DRAGADOS -POLAQUA Polonia. E-mail: igps@igps.cat

(**) Geóloga por la Universidad de Barcelona. Master en Ingeniería Geológica por la Universidad Complutense de Madrid. Empresa de geotecnia IGPS. S.L. Asesor geotécnico S-8 tramos 5.1, 5.2, 6 y 7 DRAGADOS -POLAQUA Polonia. E-mail: aina.igps@igps.e.telefonica.net

**FIGURA 1.** Aspecto de las "glinas" en sondeos helicoidales y en los sondeos de rotación.

La Figura 1 muestra el aspecto de las "glinas" que ya sean en realidad arenas o no, se identifican claramente como un material cohesivo por la cantidad de finos que tienen.

En la zona central de Polonia existe un nivel superior de "glinas" de la Glaciación "Warty", relativamente joven, en la que los CPTU ofrecen valores de punta entre 1,5 y 3 Mpa. Este depósito es somero y la práctica generalizada demuestra que pilotes de 18 m suelen tener la totalidad de la zona a la que afecta la punta en el nivel de glinas inferior (más antiguo) que ofrece resistencias de punta entre 3,5 y 10 Mpa.

**FIGURA 2.** Fotografías del proceso de ejecución y ensayo de los pilotes.

Todos los pilotes son de tipo entubado con recuperación y las características de los "pilotes iguales" aquí analizados son:

- Tipo pilotes = Camisa recuperable e inyección en punta(*).
- Longitud = 18 m
- Diámetro = 1,5 m.
- Número de ensayos analizados en el presente artículo = 33. (más 2 en pilotes de geometría diferente ejecutados en el mismo terreno).

La Figura 2 muestra diferentes detalles de los pilotes.

1. Detalle de la armadura y del tubo de inyección en la punta de los pilotes, con el llamado "protector de base" de la armadura, para que la inyección "busque" la base del pilote.
2. Momento del hormigonado y retirado progresivo de la camisa.
3. Descabezado de los pilotes.
4. Montaje de las vigas para realizar el ensayo de carga estática.

La Figura 3 muestra las diferentes disposiciones de vigas sobre los pilotes. La disposición tipo "A" se corresponde con la fotografía n°4 de la Figura 2.

Los ensayos se realizan siguiendo la Normativa Polaca. La carga se aplica en incrementos de 1/8 la carga admisible prevista del pilote (Nt). Alcanzada esta, se descarga en escalones de 1/4 y se recarga de nuevo en escalones de 1/4. El ensayo prosigue en nuevos escalones de 1/4 hasta alcanzar 1,5*Nt. Los escalones se ejecutan tras estabilizar el anterior según criterio de <0,05 mm/10 min. En la presente obra los 33 pilotes ensayados tienen 4927 KN<Nt<6179 KN, alcanzando una carga máxima de 9270 KN.

(*) Los pilotes llevan un tubo en "U" de 50 mm atado a la armadura, con tres agujeros de 8mm instalados en la punta. Pasados 15 días de su ejecución, se realiza la inyección a través de éste. La inyección se hace en escalones de 5 minutos y se mantiene el último 10 minutos. Solo se detienen las inyecciones si la cabeza del pilote sube 5 mm. Se considera aceptado el pilote cuando, además la posterior prueba de integridad (sísmica) es satisfactoria.

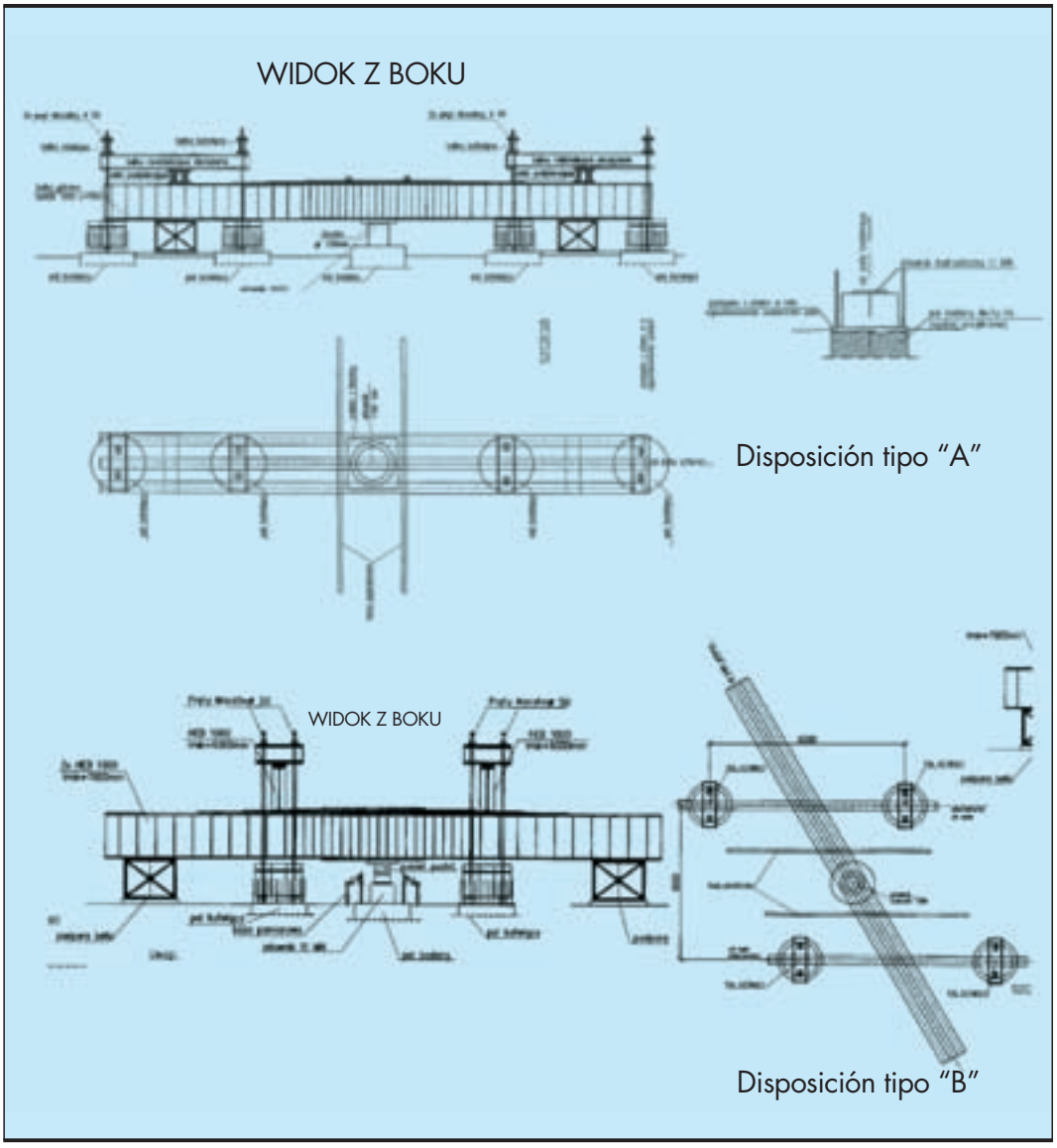



**FIGURA 3.** Croquis ensayo de cargas estáticas sobre los pilotes.

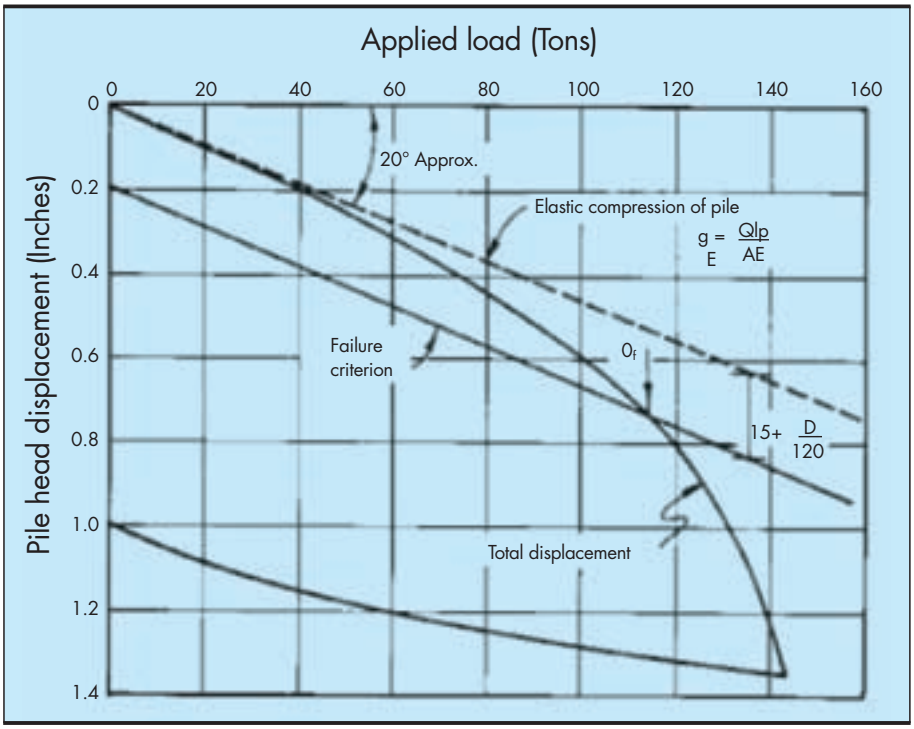



**FIGURA 4.** Construcción del valor Offset de Davisson. Figura del Illinois Institute of Technology, 1973.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS

Hay que recordar los diferentes criterios a utilizar:

**Criterio Terzaghi:** El pilote se considera "hundido" cuando se alcanza una deformación igual al 10% de su diámetro.

**Davisson Offset limit (1972):** Marca la carga correspondiente al asiento del pilote que excede a la compresión elástica del elemento en 3,81 mm. Se obtiene trazando la línea paralela al comportamiento elástico del elemento más 3,81 mm+D/120 (mm), este caso 16,3 mm, por lo que los asientos finales en este caso están en el entorno de 20 mm. Este criterio es el utilizado en varias Normativas.

En nuestro caso muchos ensayos no llegan a este valor y se ha extrapolado con la "curva ideal" de Chin-Kondner, lo que puede inducir cierto error. No obstante y en comparación con los que si llegan al valor, los resultados son coherentes.

**Chin-Kondner Extrapolation (1970):** Conocido como (Chin 1970), pero que se basa en los trabajos de Kondner (1963), consiste en extrapolar un recta desde la gráfica δ/Q cuando esta ya define una recta constante, por lo que el ensayo debe alcanzar este valor.

$$Q_{ULT} = \frac{1}{C_1} \qquad Q_{IDEAL} = \frac{\delta}{C_1\delta + C_2}$$

$C_1$=pendiente de la gráfica.

**Hansen 1963:** La capacidad del pilote es la carga que obtiene a 4 veces el movimiento de la cabeza de la pila que se había obtenido para el 80% de la carga.

$$Q_{ULT} = \frac{1}{2 * \sqrt{C_1 * C_2}}; \quad \delta_u = \frac{C_1}{C_2} \quad Q_{IDEAL} = \frac{\sqrt{\delta}}{C_1\delta + C_2}$$

$C_1$=pendiente de la gráfica.
$C_2$=intersección de la recta interpretada con el eje.

En este caso se constata que el recorrido del ensayo debe ser mayor para poder aplicar este método que para el método de Chin-Kondner. Además es sabido que es más sensible a la calidad de la toma de medidas. En el presente trabajo se ha rechazado el 36% de las interpretaciones hechas con este método.

**Decourt extrapolation (1999):** Similar a los dos anteriores, con las gráficas Excel actuales resulta el método más simple, la carga última será aquella que corta la línea de las cargas si se grafica Q/δ.

$$Q_{ULT} = \frac{C_2}{C_1}$$

$$Q_{IDEAL} = \frac{C_2\delta}{C_1\delta + 1}$$

En este caso se constata que el resultado es idéntico al de Chin-Kondner.

**PN-83/B-02482 Normativa Polaca.** Se basa en la determinación del tipo de curva A o B a aplicar en la valoración. En esencia es parecido a un "load at Maximum Curvature metode". En el caso de Curva "A" que es la usual en este tipo de pilotes en "glinas", el método queda un poco condicionado por el diseño del escalón de carga del ensayo, sin afectar demasiado al "orden de magnitud" del valor. Pero cuando el ensayo no es muy claro, queda condicionado también por la interpretación del técnico.

$$n_3 = \frac{dQ_B - dN_c^1}{Q_B - N_c^1} \quad n_4 = dN_c^1 - n_3 N_c^1 \quad N_g^1 = -\frac{n_4}{n_3}$$

$$\frac{N_c^1}{N_g^1} > 0,4 \Rightarrow N_c^0 = N_c^1 \text{ curva tipo "A"}$$

$$\frac{N_c^1}{N_g^1} < 0,4 \Rightarrow N_c^0 = Q_{MAX} \text{ curva tipo "B"}$$

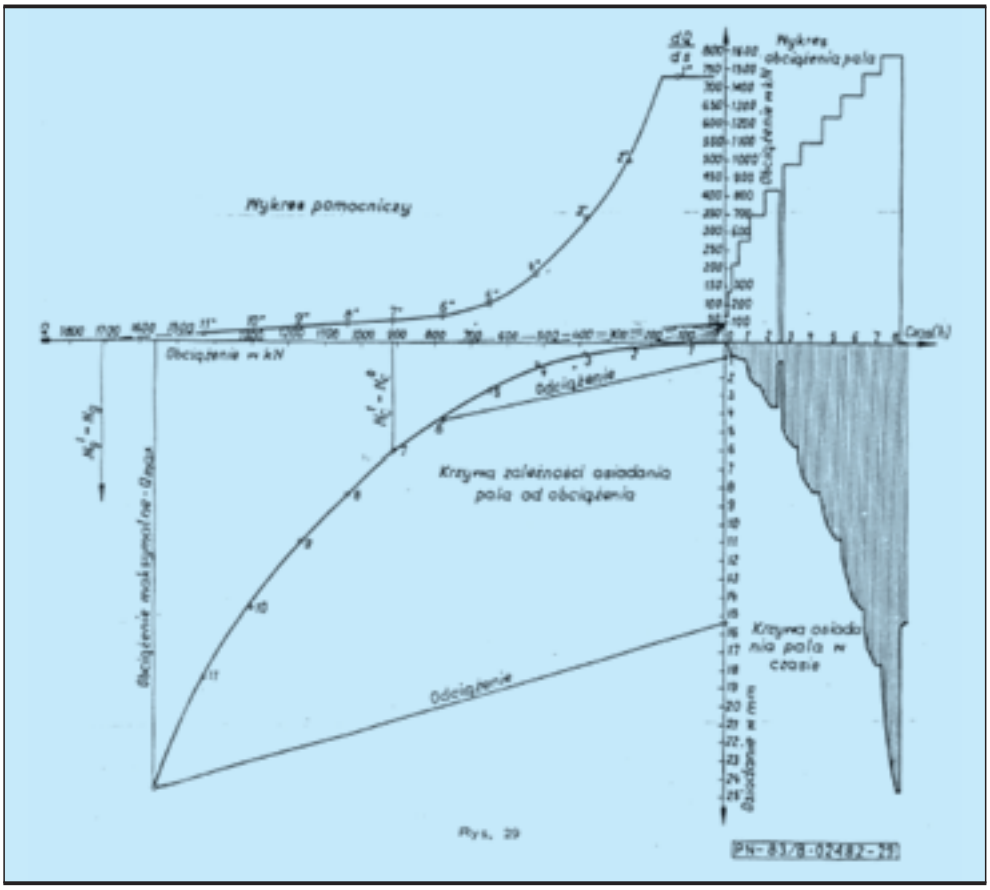



**FIGURA 5.** Estimación del valor Nc de la Normativa Polaca PN-83, B-02482.

El método permitiría también definir la que se define como "carga límite del pilote" Ng[1]. Como se verá a menudo la valoración coincide con la de Chin Kondner, pero está muy condicionada por el recorrido del ensayo y por la calidad de las lecturas y del propio ensayo, con lo que ofrece mucho error.

**Vesic (1963):** Definió que la fluencia se puede considerar aproximadamente en el escalón que ofrezca un máximo en la gráfica del incremento de asiento entre el incremento de carga. Resulta sumamente fácil de construir y no se presta a error de interpretación. Se hará una interpretación sencilla de este criterio y se comparará con la Normativa Polaca "PN", ya que responden al mismo principio.

Por último hay que hacer mención al criterio de **H. Fellinius** de tomar como contorno inferior de la estimación de capacidad de carga a aquella en la que las curvas ideales aquí definidas se sobreponen a la real del ensayo. En la presente obra hemos observado como ese valor (también ligado a cierta subjetividad) coincide con los criterios de la "PN" y al de Vesic; y obtiene los mismos valores.

En resumen se compararán métodos que responden a criterios muy diferentes. Los métodos de Decourt y de Chin-Kondner, pretenden establecer una extrapolación a la carga del hundimiento teórico del pilote, que es un valor aproximado al que produce deformación "infinita" para carga constante. El método de Hansen establecerá la carga antes de este momento. Los criterios de la Norma Polaca, de Vesic y de Fellinius vienen a establecer la carga a partir de la cual la deformación crecería muy rápidamente, y por último el criterio de Davisson da una carga de asientos acotados en relación a la deformación elástica del elemento.

## 3. EJEMPLO DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS

### 3.1. CARACTERÍSTICAS APOYO "A" DE LA ESTRUCTURA 5.29. TOMADO A MODO DE EJEMPLO

Se presenta como ejemplo de los análisis hechos en los 33 pilotes, el correspondiente al primer apoyo (podpora "A") de la Estructura 5-29 (viaducto sobre el río Konska).

La Figura 6 muestra la planta de los encepados con los pilotes ensayados y con las prospecciones hechas en cada apoyo para la caracterización del terreno. Por Normativa Polaca, el Consorcio debe realizar en cada encepado un mínimo de tres ensayos de tipo CPTU. A estos se ha añadido por parte del Consorcio sondeos de rotación para asegurar que se alcanzan las profundidades necesarias en las prospecciones que podrían dar rechazo antes de llegar a la profundidad de la punta de los pilotes y para tomar muestras inalteradas del terreno; así como se aprovechó para realizar algunos ensayos presiométricos.

### 3.2. GEOLÓGÍA-GEOTÉCNIA EN EL APOYO "A" DE LA ESTRUCTURA 5.29.

La Figura 7, en la figura de la izquierda, muestra el testigo del sondeo de rotación SR-169+049, con la profundidad a la que corresponde la punta de los pilotes. En esta zona, desde 18,8 m y hasta 19,9 m el testigo es de menor diámetro ya que corresponde a la realización de un ensayo presiométrico. En la figura de la derecha se observan los ensayos CPTU superpuestos, en los que a partir de 10 a 12 m el terreno es bastante homogéneo (como muestran también las fotografías de las cajas). Los CPTU exceden a la profundidad de la punta de

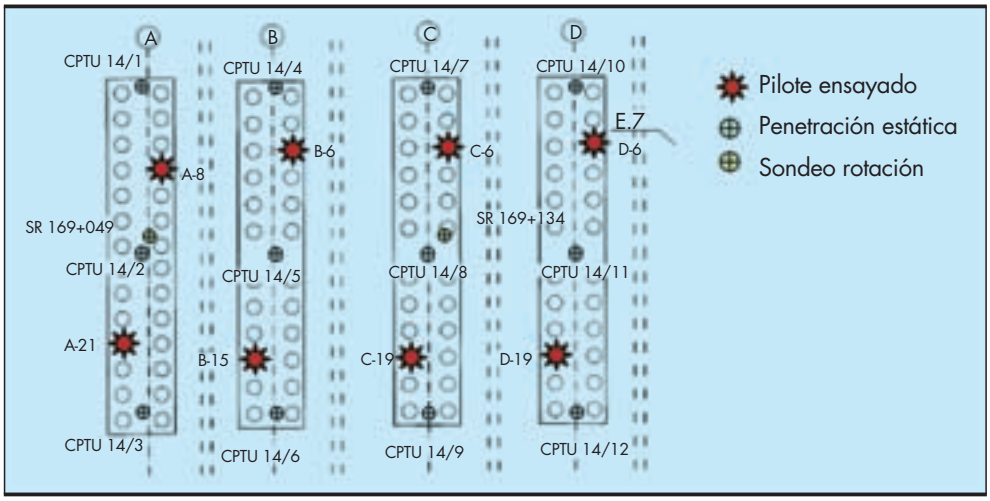



**FIGURA 6.** Planta de encepados, pilotes y prospecciones realizadas en la parte izquierda de la estructura 5.29.

los pilotes en 3,5 m y el Sondeo de rotación en 12 m. Las "glinas" son homogéneas hasta los 23 m de profundidad, es decir como mínimo 2,5D bajo la punta.

El terreno esta dividido de manera sencilla en dos niveles. El superior es el nivel Cuaternario de arenas y arcillas heterogéneas del río Konska. Su variabilidad afecta muy poco a los pilotes ya que, especialmente la zona de afectación de la punta, está por debajo de este nivel. Respecto al fuste, como se ve en los CPTUs de la Figura 7, su variabilidad está bastante acotada y es pequeña. Por debajo de este paquete se encuentran las "glinas" de qc creciente entre los 10 y los 14 m y constante por debajo de esta profundidad (síntoma claro de sobreconsolidación importante).

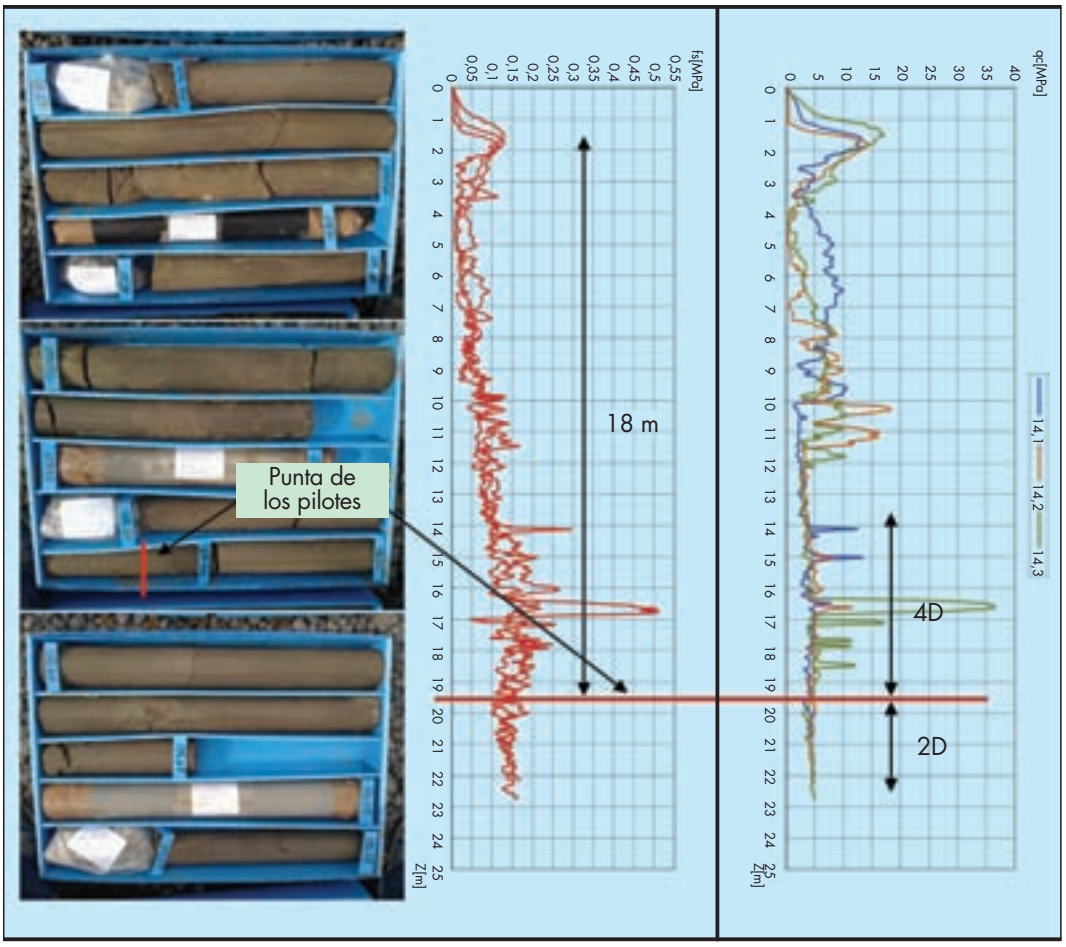



**FIGURA 7.** Ensayos de campo en la zona de los pilotes del apoyo "A".

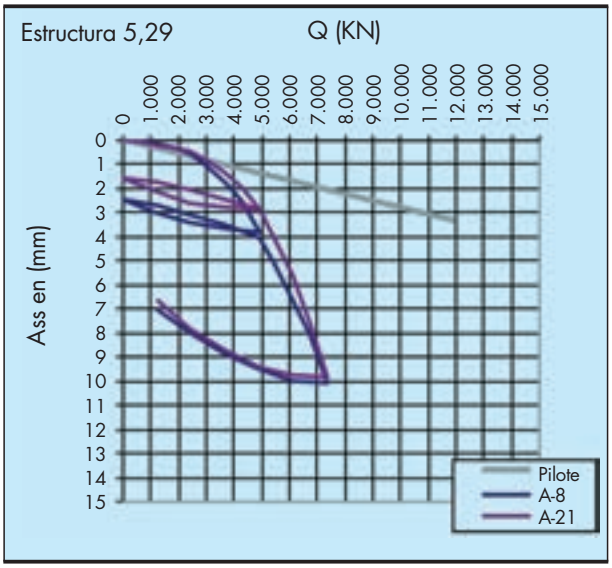



**FIGURA 8.** Asiento en cabeza de los pilotes ensayados vs Carga aplicada en esta.

### 3.3. RESULTADO DE LOS ENSAYOS "LOADING TEST" EN LOS PILOTES A-8 Y A-21 DE LA "POPDORA A", ESTRUCTURA 5-29

Se analizan los dos ensayos del apoyo "A" E-5.29, que se han comportado de manera muy similar, lo que permitirá un análisis conjunto. La deformación elástica del pilote se interpreta según $E=3*10^{-6}$ T/m$^2$.

Según las interpretaciones descritas en el apartado 2 se obtiene las gráficas de la Figura 9.

Se observa como los ensayos han arrojado valores iguales. Como es habitual la gráfica de Chin-Kondnerd ofrece los resultados más claros y a partir de los 8 mm de deformación la pendiente es la misma, lo mismo ocurre en la gráfica de Hansen y a partir de los 6000 KN en la de Decourt.

La Tabla 1 muestra el resultado de las interpretaciones que se graficaron en la Figura 9.

**PN (*)→6.651 KN**

**Davisson (offset)→8.750 KN**

**Chin-Kondner→11.162 KN**

Si se toma la valoración de Chin-Kondnerd como la de valoración máxima, se podría definir una relación de los métodos de Davisson y el de la Normativa polaca frente a esta interpretación, de:

Relación $_{Chin/davisson}$=1,27

**P**Relación $_{Chin/PN}$=1,68

La Figura 10 muestra la superposición de las curvas ideales que se hace con los diferentes métodos explicados, sobre las curvas reales de los dos ensayos hechos en los pilotes.

(*) Normativa Polaca.

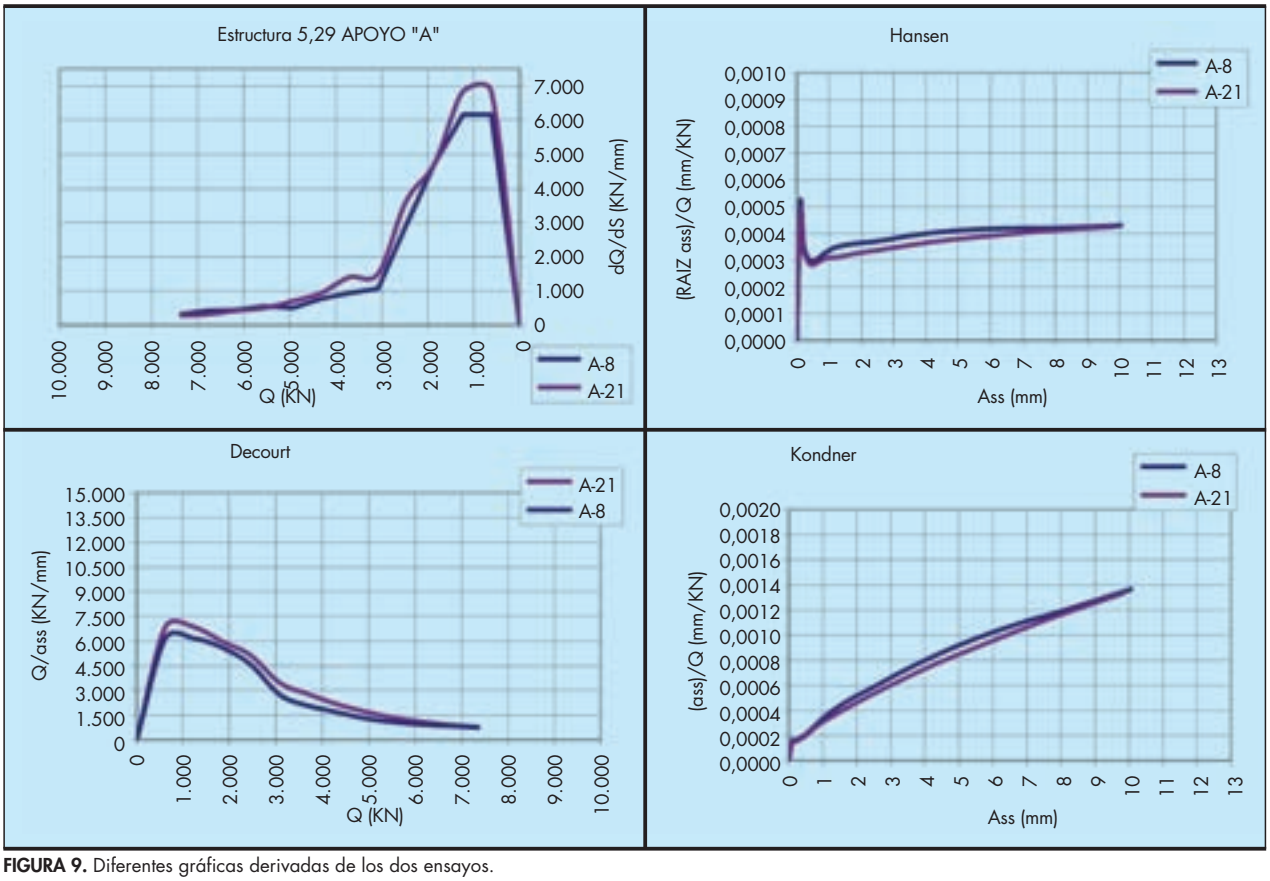



**FIGURA 9.** Diferentes gráficas derivadas de los dos ensayos.

| pilote A-8 | C1 | C2 | d ult (mm) | Qult |
|---|---|---|---|---|
| HanseN 1963 | 5,00E-06 | 0,00038 | 76 | **11470,8** |
| Kondner | 8,60E-05 | 0,0005 | | **11627,9** |
| decourt | 0,1745 | 2016,8 | | **11557,6** |
| **pilote A-21** | **C1** | **C2** | **d ult (mm)** | **Qult** |
| HanseN 1963 | 8,40E-06 | 0,00034 | 40 | **9356,0** |
| Kondner | 9,35E-05 | 0,000405 | | **10695,2** |
| decourt | 0,2221 | 2390 | | **10760,9** |

**TABLA 1.** Interpretación de parámetros que definieron de la Figura 9.

| pilote | davisson | N polaca | Hansen 63 | Kondner 63 | Decourt 99 |
|---|---|---|---|---|---|
| A-8 | 8800 | 6651 | 11470,8 | 11627,9 | 11557,6 |
| A-21 | 8700 | 6651 | 9356 | 10695,2 | 10760,9 |
| **MEDIA** | **8750** | **6651** | **10413** | **11162** | **11159** |

**TABLA 2.** Valor final de los cálculos según los diferentes métodos de análisis.

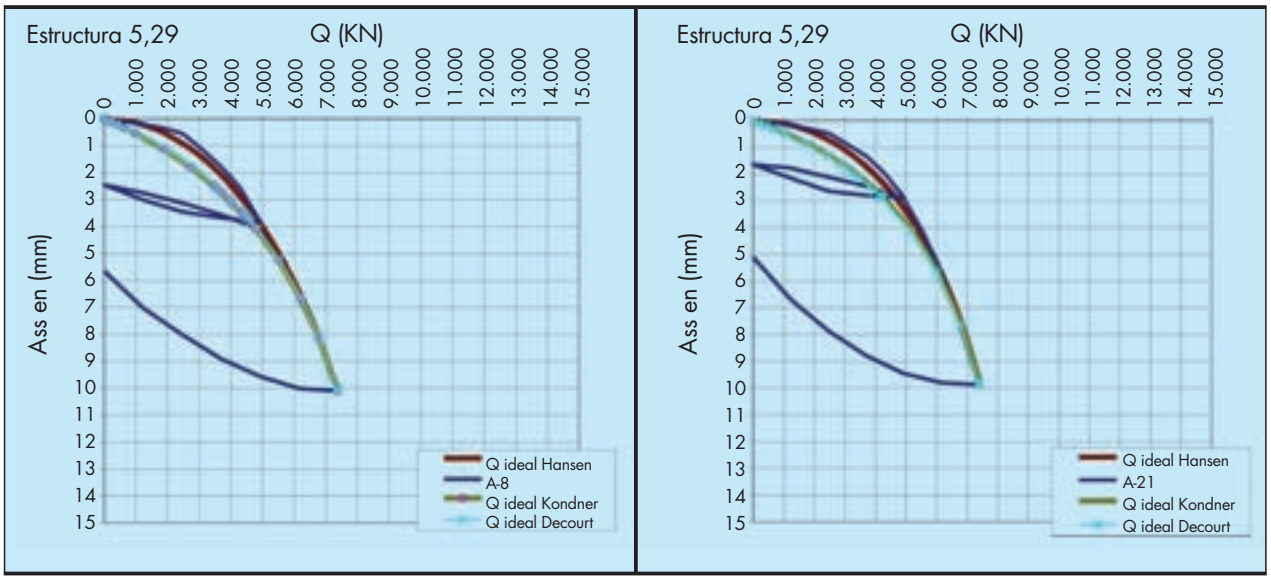



**FIGURA 10.** Superposición de las "curvas ideales" sobre las reales de ensayo.

En los 33 ensayos analizados a continuación se comprobó la correcta reconstrucción de las curvas de campo para aceptar las interpretaciones. En varios casos se rechazó la interpretación de Hansen por ser corto el ensayo (lo que implica error en la interpretación).

Es interesante observar que las "curvas ideales" se sobreponen sobre las de ensayo entre 5000 y 6775 KN, siendo según Fellinius este valor el aceptable en la carga de los futuros pilotes y coincidiendo con los criterios de Vesic y el de la Normativa Polaca.

Discernir en pilotes sin instrumentar la parte que se lleva la punta y la que se lleva el fuste es difícil. Si se aplicara el método de Weele 1957 se obtendría la Figura 11.

El valor obtenido sería de 4900 KN. Pero solamente hay dos ciclos de carga descarga. Por lo que el valor será solamente una aproximación muy grosera, aunque resultará coincidente con los métodos de preestimación que se presentarán.

Se ha de observar en este ejemplo como la interpretación del valor de la PN, hecho por el técnico de la empresa que realiza los ensayos de carga, es muy interpretativo, ya que la Figura 9 podría llevar a una interpretación de un valor situado entre los 5000 y 6000 KN. Si se plantea el criterio de Vesic directamente se puede obtener la Figura 12. Y observar como el valor a tomar podría ser claramente del orden descrito. Qf=5543 KN (máximo de las gráficas).

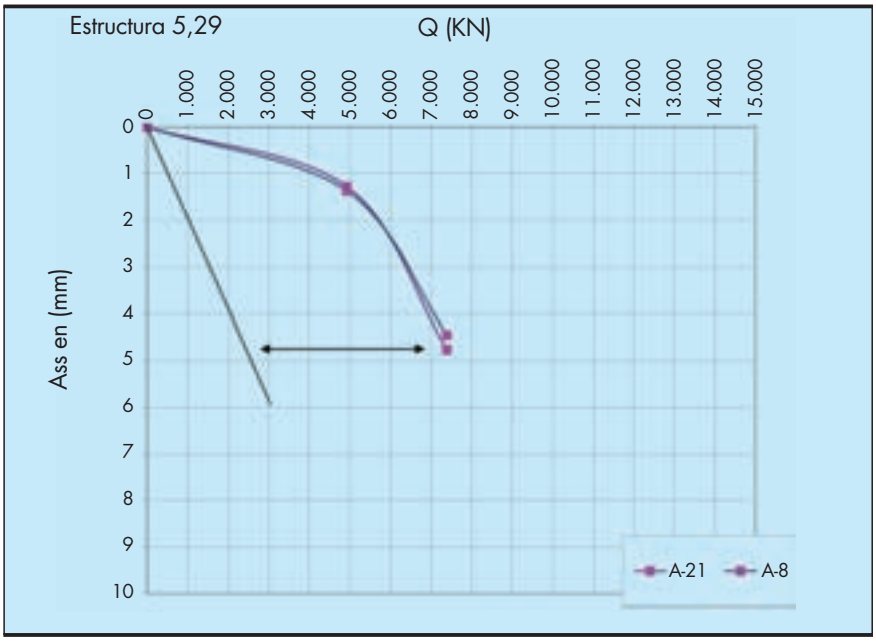



**FIGURA 11.** Interpretación del rozamiento de Weele 1957.

En este caso existiría un 20% de variación en el valor respecto a lo considerado por el técnico polaco con la PN. Hay que precisar que es el máximo que se ha observado en los 33 análisis hechos. La Figura 13 muestra la diferencia entre establecer la Q de fluencia utilizando el método de Vesic y utilizando la interpretación del técnico polaco de la PN. La variación estuvo entre el 90% y el 120%. En 18 casos con la PN se sobreestima Qf (54,54 % de las medidas), en 5 se infraestima (15,15%) y en 10 casos se obtiene el mismo resultado (30,3%).

## 4. ANÁLISIS DE LOS 33 ENSAYOS TOMADOS COMO "TIPO" EN "GLINAS"

### 4.1. RESULTADO DE LOS ENSAYOS RESPECTO A LA CALIDAD DEL TERRENO

Del mismo modo que en el ejemplo del apartado nº3, se han realizado los restantes 31 pilotes que forman parte del presente análisis. En cada apoyo se ha hecho el correspondiente estudio geotécnico con 3 CPTU y sondeos de rotación. La Figura 14 muestra el resultado de los ensayos de carga con las interpretaciones de Chin-Kondner, Offset de Davisson, Vesic y según el análisis de la Normativa Polaca (PN), acorde a la descripción que se ha hecho de estos en el apartado 2.

La dispersión de los resultados está condicionada en gran parte por el nivel superior de "glinas" en unas zonas (formación Warty), y depósitos aún más jóvenes en otras, como era el caso del ejemplo "Popdora A" estructura E-5.29, en la que el nivel superior eran depósitos fluviales actuales. Estos niveles no afectan nunca a las puntas de los pilotes, pero si al fuste y se genera cierta dispersión. En otras ocasiones la superposición de los ensayos CPTU de investigación del terreno no es totalmente homogénea y obliga a escoger un valor promedio de qt, que puede originar también cierta dispersión.

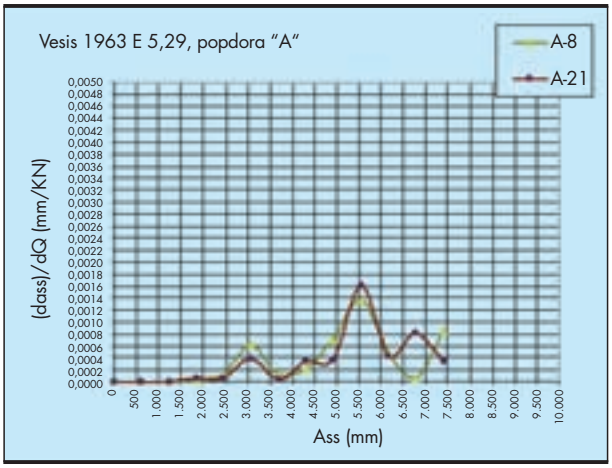



**FIGURA 12.** Graficación incrementos de asiento vs los de carga.

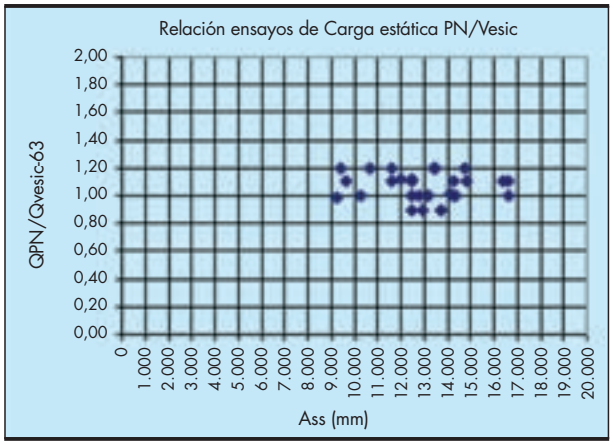



**FIGURA 13.** Variación en la estimación de la Qf utilizando la PN en relación directa al criterio de Vesic 63.

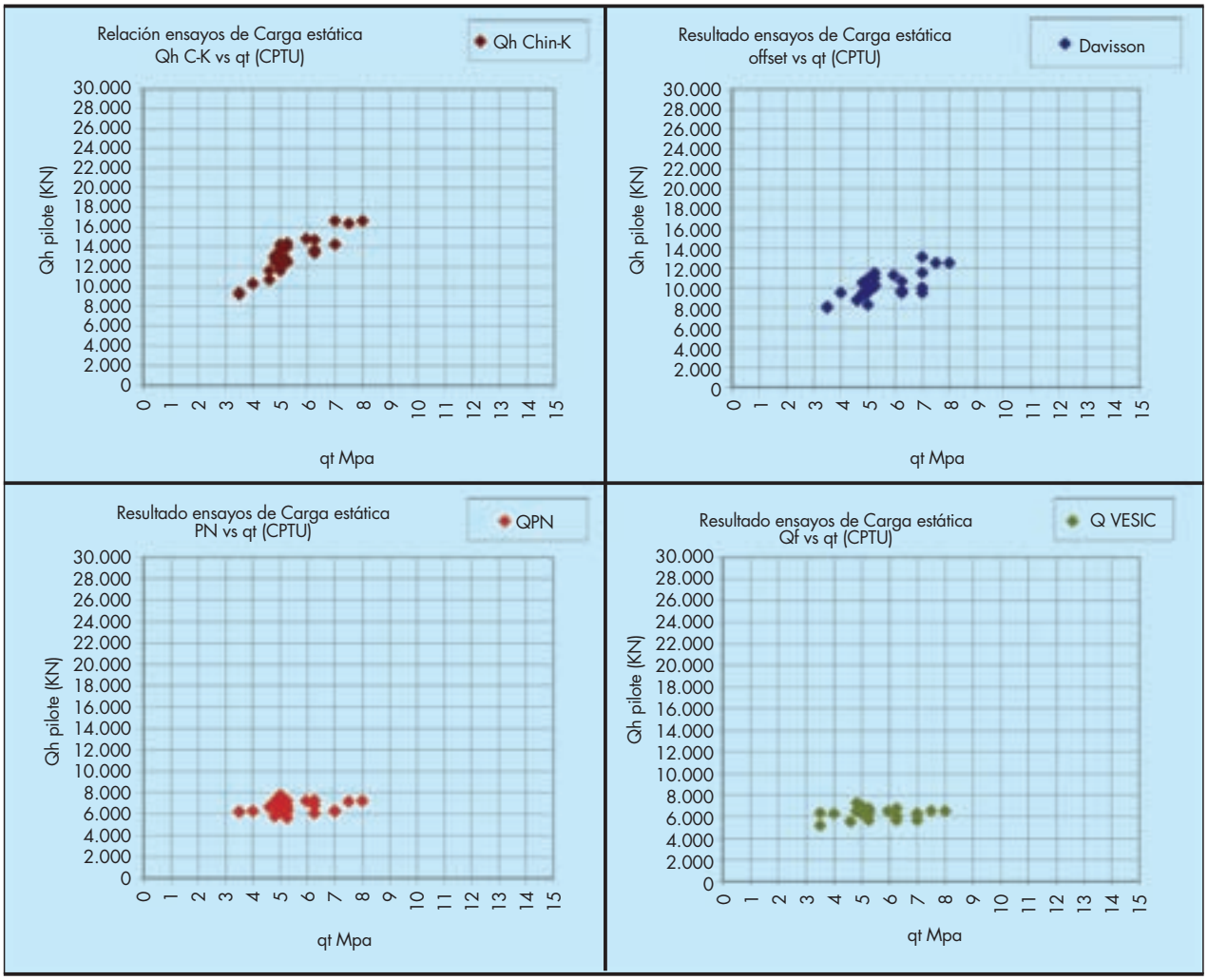



**FIGURA 14.** Resultado de la interpretación de los ensayos.

Resulta evidente que en la interpretación de la Normativa Polaca y la de Vesic-63 (como sucedería con la de Fellinius) el resultado es prácticamente siempre el mismo indistintamente de la qc del penetrómetro. De ahí que en esta zona de Polonia los pilotes se diseñen de manera muy similar (L=18 m y D=1,5 m) y se le exija un máximo de trabajo entorno a 5000 KN para no tener luego problemas con los ensayos de comprobación. De hecho los problemas se dan usualmente en los pilotes con puntas en arenas, ya que el pilote encamisado provoca en algunos casos el sifonamiento del terreno, y en zonas de resistencias de punta del cono de 20 y 30 Mpa se obtiene finalmente pilotes que solamente ofrecen de 2.000 a 3.000 KN (con Normativa Polaca).

La Figura 15a muestra el resultado de las interpretaciones de Hansen, sobrepuesta a la de Chin-Kondner. Destaca el hecho de que la interpretación de 21 ensayos es, a la práctica coincidente a la baja con Chin-Kondner y Decourt, hecho habitual; pero hay 12 (dos se salen del gráfico) que no coinciden y cuyo valor no se alinea de ninguna manera con el resto. Por lo que esta interpretación no parece del todo fiable en estos ensayos.

La Figura 15b muestra el resultado de las interpretaciones de Ng1 (carga última según la Normativa Polaca "PN"), sobrepuesta a la de Chin-Kondner. Al igual que sucedía con la valoración de Hansen los ensayos que no tienen un recorrido suficiente no se interpretan adecuadamente.

En todos los casos se observa como las extrapolaciones dan el valor en un momento de la gráfica en el que a carga constante la deformación se hace "infinita".

## 4.2. PROPORCIONALIDAD ENTRE LAS DISTINTAS INTERPRETACIONES

La Figura 16 muestra la relación que existe entre el valor que interpreta Chin-Kondner y el valor obtenido por la Normativa Polaca, tal cual la interpreta el técnico polaco(*).

La relación respecto a la interpretación de Chin-Kondner parte de 1,5 para los valores más bajos y llega hasta 2,66, lo que sin duda es un valor muy elevado. Como se verá más

(*) Varios autores han discutido que estas extrapolaciones se deban tomar como valores de carga de hundimiento real. Pero la ausencia de ensayos completos, nos lleva a hacer una interpretación respecto a estas. Pero hay que mencionar que se recomienda no exceder jamás en un diseño la carga máxima a la que llegó el propio ensayo.

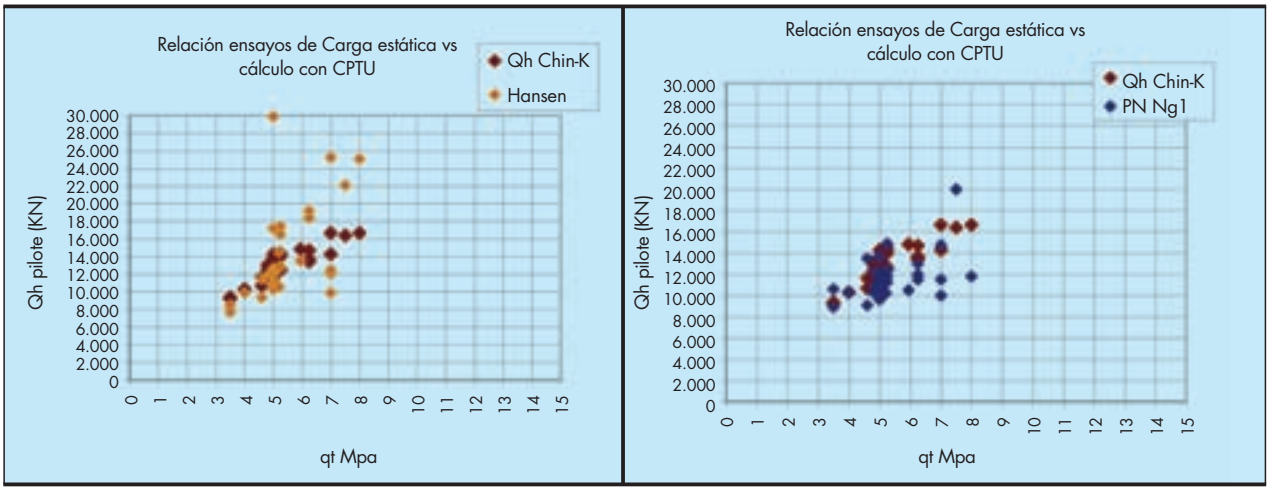



**FIGURA 15.** Resultado de la interpretación de los ensayos según Chin-Kondner y según Hansen.

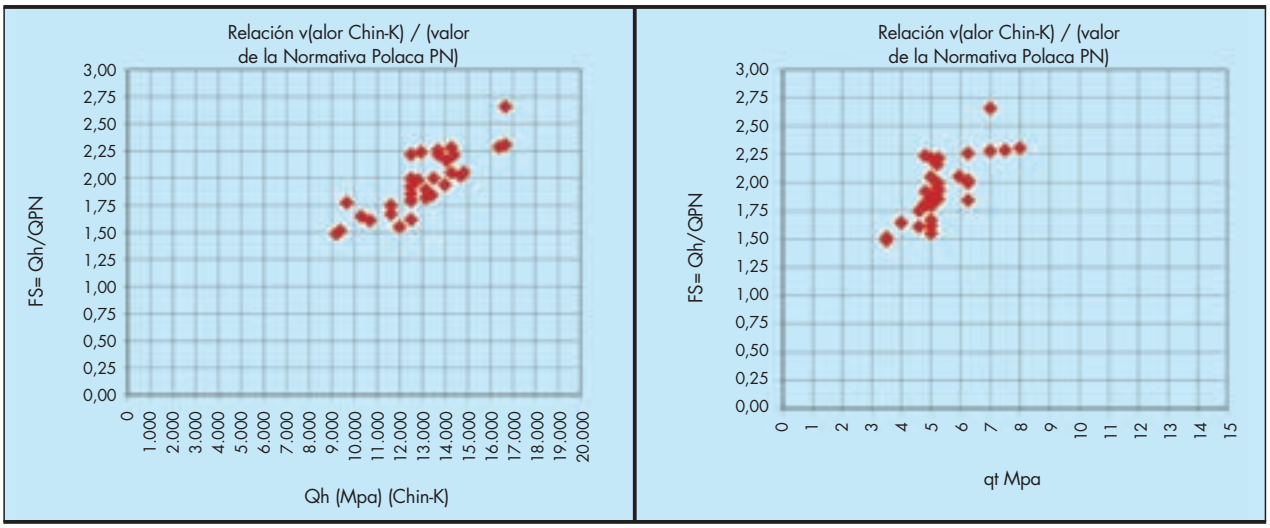



**FIGURA 16.** Relación entre valores interpretados por Chin-Kondner u los interpretados por la Normativa Polaca.

adelante con otras geometrías de pilotes los valores son similares.

$$1{,}5<\text{Relación}_{\text{Chin/PN}}<2{,}66$$

La Figura 17 muestra que lo mismo sucede con la interpretación de Vesic que ya obtenía valores similares a los de la "PN".

La Figura 18 muestra la relación (también respecto a Chin-Kondner) que arrojaría el método de Davisson en este caso.

Este método requiere de mayor recorrido de ensayo al que aquí se obtenía en muchos de los ensayos Loading Test, por lo que se ha aplicado muchas veces sobre la curva reconstruida de Chin-Kondner. De ahí que pueda existir una cierta falta de precisión. Se sabe también que esta interpretación se ve bastante afectada por otros condicionantes como la precisión y calidad del ensayo. No obstante parece lógico pensar que la proporcionalidad frente a la carga de Chin-Kondner está entorno a 1,2 o 1,25, pero la dispersión de los datos exige cierta *prudencia* en esta valoración.

$$\text{Relación}_{\text{Chin-K/Offset}}\approx 1{,}25$$

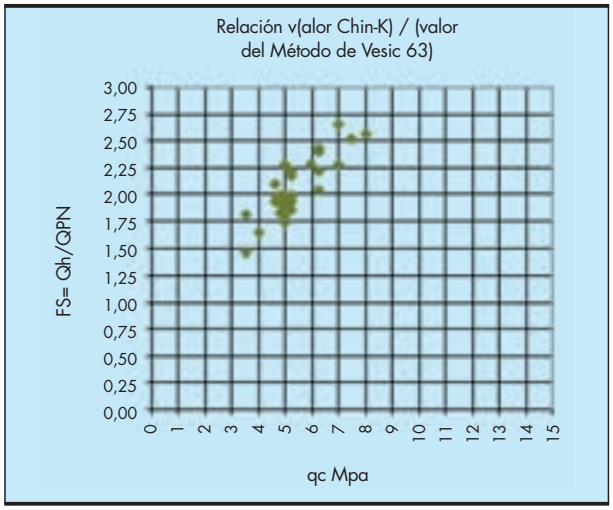



**FIGURA 17.** Relación entre el valor de la interpretación de Chin-Kondner y la de Vesic-63.

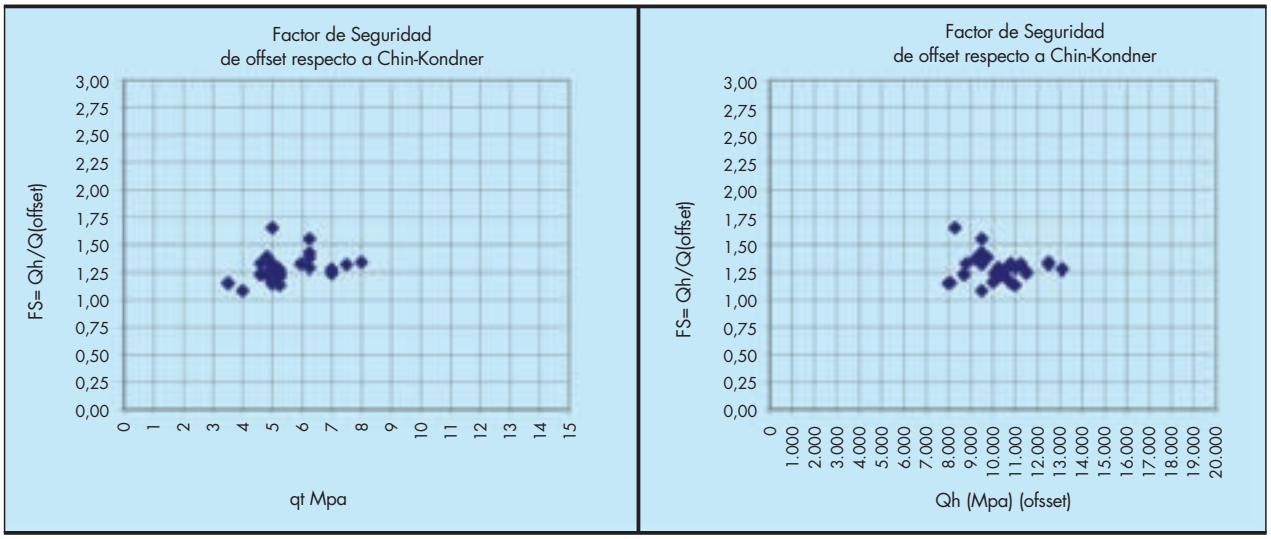



**FIGURA 18.** Relación entre el valor de la interpretación de Chin-Kondner respecto al método Offset.

### 4.3. ASIENTOS EN EL VALOR DE CARGA ACEPTADO POR LAS DISTINTAS INTERPRETACIONES

Resulta muy interesante observar los asientos que se determinan en las interpretaciones de los ensayos realizados. La Figura 19 muestra los ensayos en el valor de la "Q" que determina la Normativa Polaca; y los que se obtienen con el método del Offset de Davisson. También se muestran los valores con la interpretación de Vesic-63 que no queda sujeta a la subjetividad del técnico.

La Normativa Polaca produce una limitación de asientos de valores bajos, pero con una gran dispersión en estos, mientras que el valor de la carga es bastante homogéneo. La interpretación con método de Vesic homogeniza más ambos valores. Por su parte el método Offset de Davisson obtiene valores muy homogéneos de asientos que quedan por debajo de 20mm, pero tiene gran dispersión en la carga, eso si, tal y como mostraba la Figura 14 de manera proporcional a la calidad del terreno.

$$2{,}7<\delta_{PN}<10 \text{ mm}$$
$$17{,}5<\delta_{Offset}<20 \text{ mm}$$

Por otro lado se observa como la carga de fluencia de la "PN" (y la interpretación de Vésic 63) está en el orden de magnitud de otros métodos de mismo criterio (AASHO 6mm; Código de Boston 12 mm; Magnel 8 mm).

Por último se ha de mencionar que los asientos últimos de Hansen, en los ensayos aceptados se situaron entre 25 y 80 mm.

Estos asientos comparados con los que se obtendría por diferentes métodos de cálculo son aproximadamente del 20%. La Figura 20 muestra la relación asientos esperados vs los obtenidos a los valores de Nt de cargas admisibles consideradas en los pilotes entorno a 5500 KN.

Se consideran los asientos teóricos según:

$$\delta_{teorico} = N_t * \left[\frac{D}{40 * Qh} + \frac{L_c}{AE}\right]$$

lo que es válido en la GCOC española y muy similar a lo que se obtiene aplicando la "PN" polaca.

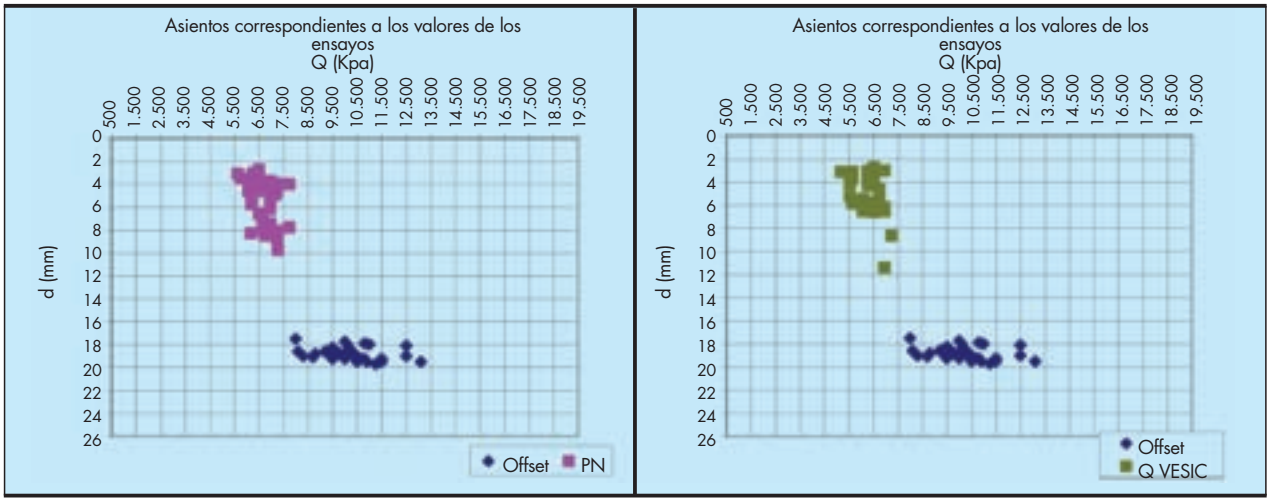



**FIGURA 19.** Asientos obtenidos en las cargas que definen la PN, Vesic y el método Offset.

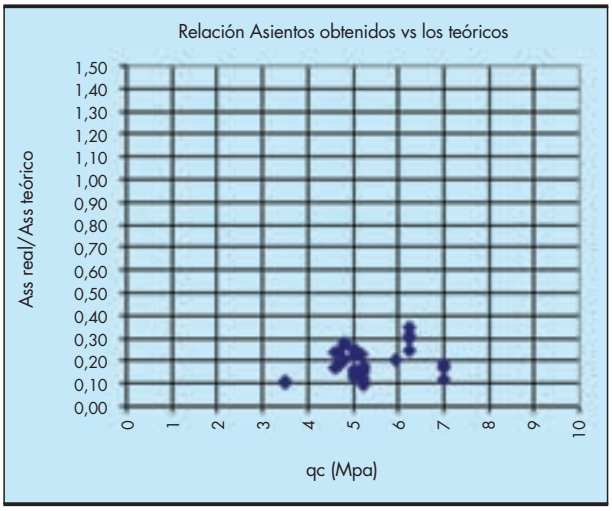



**FIGURA 20.** Relación de asientos obtenidos respecto a los esperados.

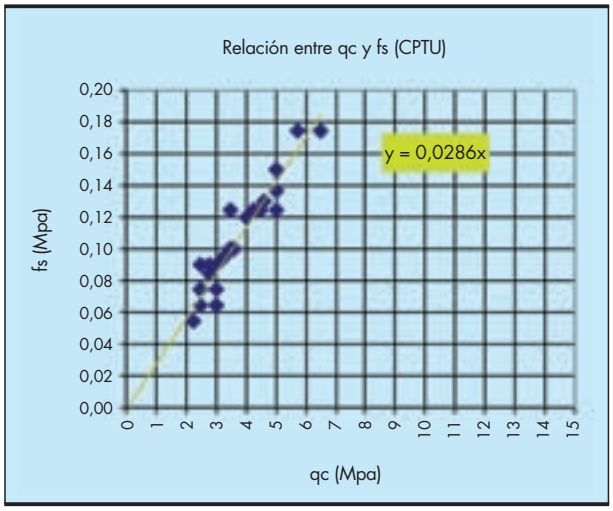



**FIGURA 22.** Relación entre qt y fs en los CPTU utilizados.

## 5. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD PORTANTE POR MÉTODOS ANALÍTICOS

### 5.1. DIFERENTES CORRELACIONES

- **Métodos basados en relación directa a la punta y el faldón del CPTU**

Se basa en la aplicación directa de las mediciones de la punta y los faldones del CPTU, corregidos, por el tipo de terreno, tipo de pilote, forma de la punta, (bearing capacity factor) y el fuste por el coeficiente de la adherencia (friction coefficient). Se puede expresar de forma generalizada como:

$$qp=\beta \text{ x } qc \;//y//\; \tau_f = \alpha^* f_s$$

Lo que aquí se define como $\alpha$ y $\beta$ tiene diferente simbología según la Normativa utilizada.

En general las Guías *usualmente* se observa un valor de beta que oscila entre:

$$0{,}4 \leq \beta \leq 1$$

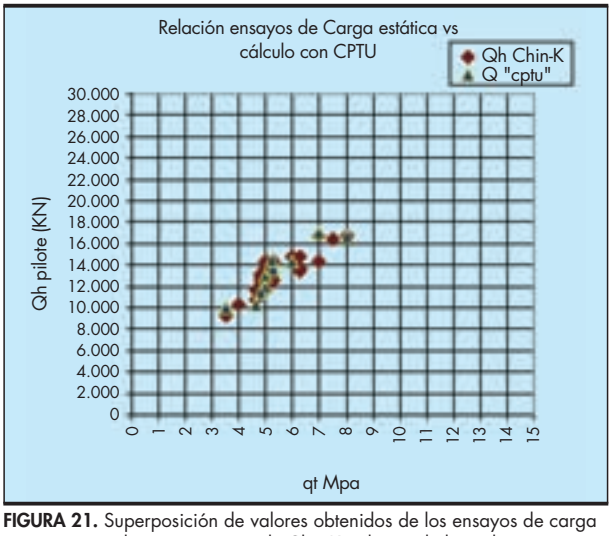



**FIGURA 21.** Superposición de valores obtenidos de los ensayos de carga estática según la interpretación de Chin-Kondner y de los valores establecidos desde el CPTU con $\beta$=0,66 y $\alpha$=1.

Según Schmertmann and Nottinghan (78 y 75) $\beta \approx 0{,}5$ a 1 según el OCR. Una valoración baja de este parámetro lo encontramos en la guía española GCOC que designa $\beta \approx 0{,}4$ a 0,6 según la naturaleza del terreno, y las valoraciones altas, por ejemplo las considera la Canadiense FM-CGS $\beta \approx 1$.

Para el rozamiento pilote-terreno las Guías recomiendan un valor que oscila entre:

$$0{,}75 \leq \alpha \leq 1$$

Con limitaciones variables en el valor de fuste efectivo final, desde 60 Kpa hasta ninguna.

Se propone las estimaciones:

**qp=0,66 x qc.**

$$\tau_f = f_s \leq 110_Kpa$$

Esta limitación a 110 Kpa está en el orden de magnitud propuesto por Verbrugge con pilotes perforados de hormigón en terrenos limosos de 4,5 Mpa<qc<6 Mpa donde la limitación ha de estar entre 0,01 y 0,037 qc. En nuestro caso esta limitación ha implicado un valor entre 0,017 y 0,024 qt.

La Figura 21 muestra la superposición del cálculo de las cargas de hundimiento con estos valores sobre los resultados que se obtuvo en los ensayos de carga estática, para varias de las estructuras analizadas, en las que los CPTU excedían la profundidad de las puntas de los pilotes en un mínimo de 2,5D.

Si se desea establecer métodos basados únicamente en la punta del CPTU, se muestra la Figura 22 donde se realiza la correlación entre los valores de punta y de faldón obtenidos en los ensayos CPTU utilizados en este trabajo.

Puede considerarse en estas "glinas":

**fs=0,0286*qt**

- **Métodos basados en los resultados de los ensayos presiométricos tipo OYO**

Son ensayos discontinuos y por lo tanto que implican menor certeza en la representatividad de los mismos frente a la naturaleza cambiante o no del terreno; no obstante puede suceder que los ensayos CPTU no alcancen las profundidades de influencia de las puntas de los pilotes. Por lo que se pueden convertir, en ocasiones, en una de las pocas herramientas habidas para definir capacidades portantes con ensayos "in situ".

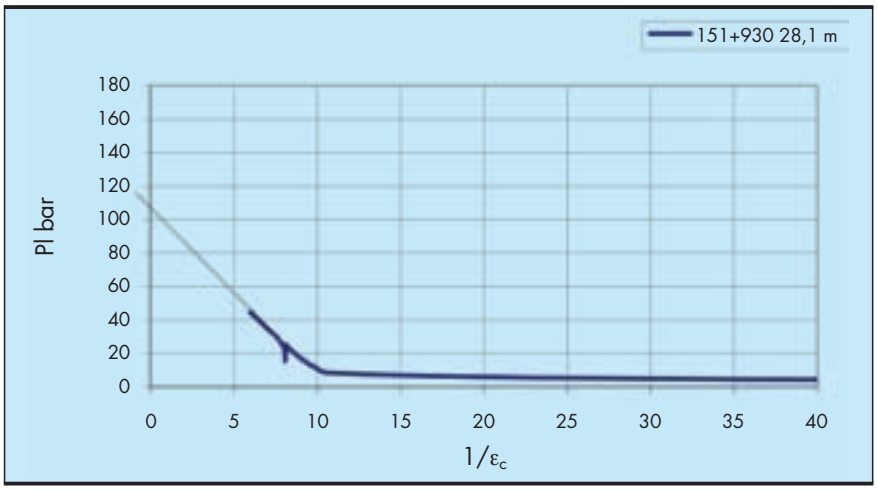



**FIGURA 23.** Ensayo 151+930 a 27,9 m de profundidad determinación de Pl (Bar).

Se basan en aplicar a la presión límite un factor corrector debido al tipo de terreno. Y se interpreta el rozamiento como una fracción proporcional a la tensión aplicada en la punta.

$$qp=K(pl-KoPo)$$

$$\tau = \frac{qp}{\lambda}$$

En las normativas K suele oscilar entre 1,5 y 3,2 y landa (λ) entre 10 y 40. Hay que especificar que en varias de estas normativas, como en el Euro Código o en la Francesa, se define claramente que estas fórmulas se utilizan con presiometros tipo Menard y no son pocos los artículos que precisan que el tipo OYO aquí utilizado debería disponer de formulaciones propias.

Se establece la **Presión Límite** (Pl) OYO según la definición de Mair&Wood 1987 en el punto donde 1/εc≈0.

La Figura 24 muestra el resultado de la graficación del valor de fs obtenido en el faldón del CPTU en cada estrato, respecto a la presión límite OYO propia de dicho estrato.

Se debe observar las diferentes unidades de la gráfica y se puede establecer:

$$\tau \approx P^*_1/22 \text{ o bien } \tau \approx qp/24$$

Respecto a la resistencia de punta se propone:

$$\mathbf{qp=1,1*Pl^*}$$

Realizando el cálculo en las estructuras seleccionadas en las que la información presiométrica es suficiente, se obtiene el resultado que muestra la Figura 25.

- **Métodos basados en Ensayos de laboratorio**

La toma de muestras en sondeos de rotación permitirá también alcanzar las profundidades necesarias para caracterizar el terreno que afectará a las puntas de los pilotes.

Lo habitual es obtener la "Su" con ensayos triaxiales No Drenados y definir por teorema de Cota:

$$qp=9*f_D*Su$$

$$\tau_f = \alpha * Su$$

Su = Resistencia al corte no drenada.

$f_{Dc}$= Factor de reducción por la forma del pilote (o solamente de su punta).

α = Coeficiente de reducción para el fuste.

Evidentemente no puede haber grandes diferencias entre las distintas Normativas. Las diferencias estarían en factores de

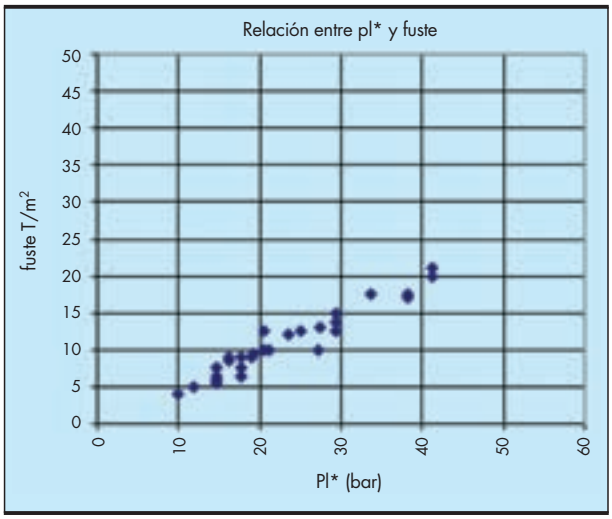



**FIGURA 24.** Relación entre el fs obtenido con el CPTU y la presión límite neta del estrato en cuestión.

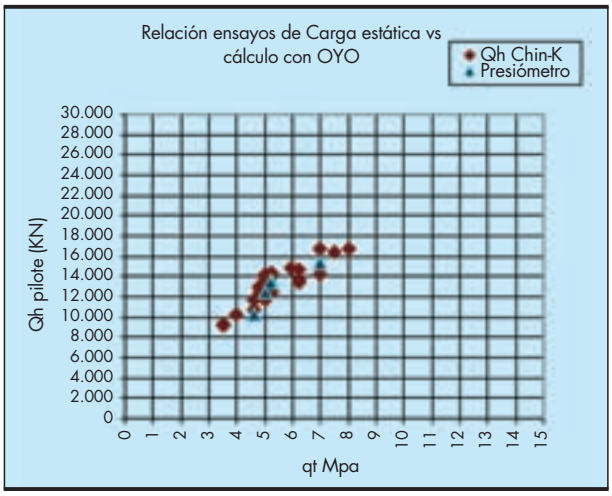



**FIGURA 25.** Superposición de valores obtenidos de los ensayos de carga estática según la interpretación de Chin-Kondner y de los valores establecidos desde el método presiométrico con K=1,1 y λ=24.

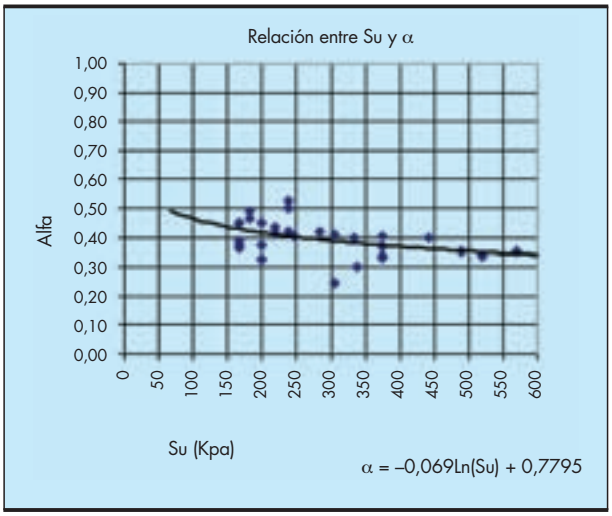



**FIGURA 26.** Relación entre α y Su, partiendo del valor de fs del CPTU.

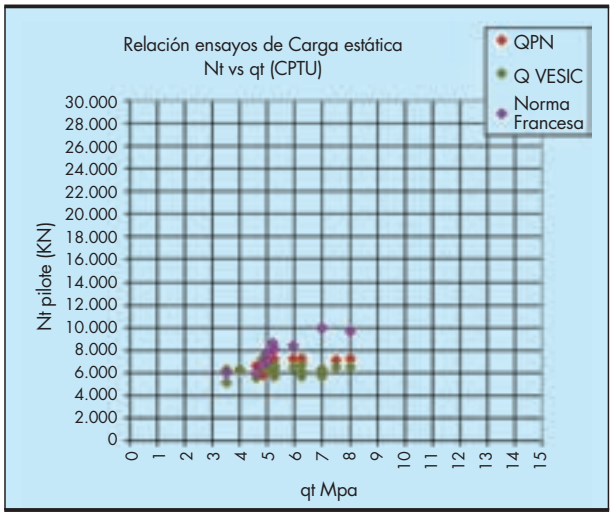



**FIGURA 27.** Relación entre α y Su, partiendo del valor de fs del CPTU.

forma de la capacidad por punta ($f_D$), y en la evaluación del rozamiento y su limitación (α*Su). Respecto al factor de forma es importante recordar que para Skempton 1953 en toda cimentación existe un factor de forma que va de 6 a 9, pero se determinaría en función de L/D, no solamente de D. Siendo qp=(6 a 9)* Su. En pilotes de L/D=12 como los aquí analizados se definiría 9*Su.

En el parámetro del rozamiento (α) existe mucha dispersión y su valor suele estar entre 0,2 y 1. Son conocidos los gráficos de Kérisel, Peck, Tomilinson, Woodward, recogidos por Jimenez Salas, así como los de Dennis&Olson 1983 y Stesand&Kulhawy 1984. Golder and Leonard consideraron para pilotes excavados en arcillas de Londres valores de α≈0,25 a 0,7. En estas mismas arcillas Tomlinson (1957) y Skempton (1959) definieron α≈0,45. Realmente (α) está condicionada por el propio valor de la "Su", lo que lleva al hecho de intentar establecerla de manera variable en función a esta.

La Figura 26 muestra la gráfica del valor de α que sería necesario multiplicar a "Su" para obtener el valor de fs obtenido en el faldón del CPTU en cada estrato.

La gráfica resultante está en el orden de magnitud de las que suelen encontrarse en la bibliografía de este tipo de estudios. Definimos:

$$\alpha \approx 0{,}78-0{,}069*LN(Su\ (Kpa))$$

Para la punta se acepta el valor fd=1. →**qp=9 *Su**

## 6. ESTIMACIÓN DE VALOR DE CARGA DE LA INTERPRETACIÓN POLACA

Podemos establecer dos formas de evaluar la Carga de fluencia que sea equivalente a la de la Normativa Polaca y a Vesic-63. El primer método es similar al adoptado para cargas últimas y ajustar solamente α y β. Se obtendría:

$$qp=0{,}1*qt$$
$$t=fs\ (<80\ Kpa)$$

No obstante un análisis de estos resultados muestra que el valor de la punta es casi residual frente al del fuste en estos pilotes, siendo el valor final el deseado pero el proceso puede ser poco realista.

También se observa como la recomendación de la Norma Francesa de considerar:

$$Nt=Qp/2+Qf/1{,}5$$

La Figura 27 muestra como esta interpretación ofrece resultados satisfactorios aplicándola al método Polaco y al criterio de Vesic, en los ensayos realizados en pilotes ejecutados en "glinas" de resistencia de punta entre 3 y 5 Mpa, pero se debe descartar claramente para los ejecutados en terrenos más competentes.

Aplicando correlaciones que se han hallado en esta obra para el CPTU, se puede proponer:

$$\mathbf{qp\ (Kpa) =1095+500\ LN(qt)\ (Mpa)}$$
$$\mathbf{\tau\ (Kpa)\approx 29{,}7+11{,}25\ LN(qt)\ (Mpa)}$$

## 7. CONLUSIONES

En el presente artículo se ha intentado de una manera muy sencilla establecer formulaciones de preestimación de los valores que obtendrán los ensayos de carga estática en pilotes emplazados en materiales glaciales polacos (limos y arenas arcillosas), con el uso de ensayos CPTU, Presiometros OYO y con ensayos de laboratorio.

También se ha realizado la comparativa entre los valores que interpreta la Normativa Polaca en los ensayos de carga y otros como Chin-Kondner, Decourt, Hansen, el Offset de Davinson y la carga de fluencia de Vesic-63.

Los resultados que ofrece el método de la Normativa Polaca (PN), el método de Fellinius y el de Vesic-63 son totalmente similares, con la salvedad de que este último no depende de la subjetividad del técnico que los analiza. Todos ellos son métodos que establecen cargas aproximadamente de inicio de fluencia y que significan asientos inferiores a los 10 mm. La mejora de la calidad del terreno tiene poca incidencia en el resultado de la interpretación del ensayo.

Las interpretaciones de Chin-Kondner y Decourt son extrapolaciones que intentan hallar cargas últimas o de hundimiento, pero por su propia naturaleza de extrapolación se deben tratar con cautela. Han dado valores que se alinean muy bien con la calidad del terreno. Usualmente se recomienda no aceptar valores superiores a los alcanzados por el propio ensayo, con todo y que siendo aquí el valor máximo de ensayo 1,5*Nt, puede ser una recomendación en exceso conservadora.

La interpretación de Hansen es en la mitad de los casos poco creíble debido al corto recorrido de los ensayos, a la precisión de la toma de datos, etc. Los valores aceptados, han

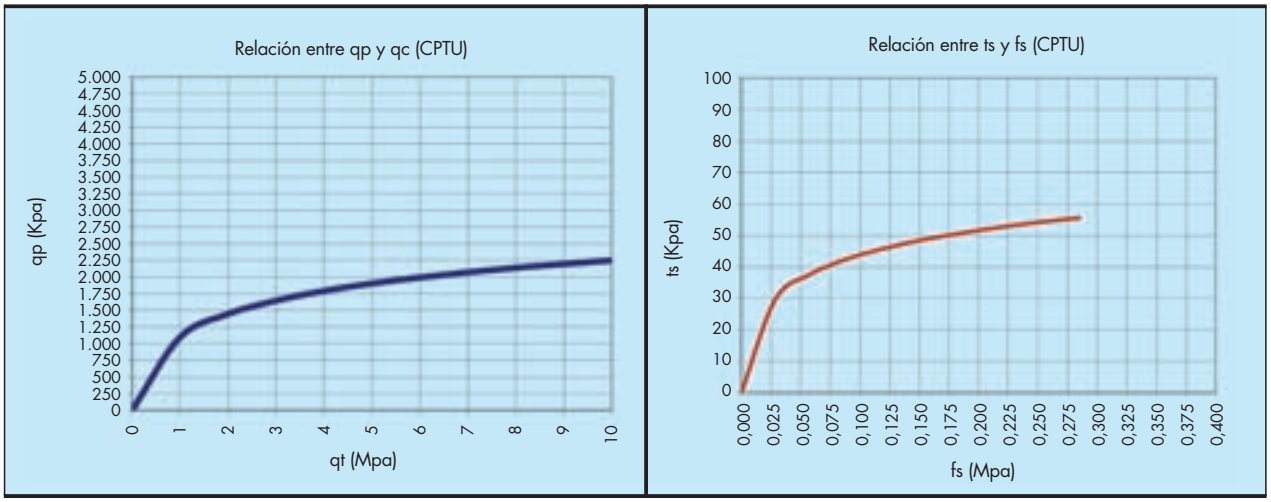



**FIGURA 28.** Gráficas cálculo carga Nt para aplicar la Normativa Polaca a ensayos de carga estática de pilotes.

sido, como es habitual, algo más bajos que los de Chin-Kondner y Decourt. Los asientos en el valor de la interpretación han variado mucho entre 25 mm y 430 mm.

El método de la Normativa polaca para establecer la carga última Ng[1] tiene el mismo problema que el de Hansen con la calidad de la toma de datos, recorrido de ensayo, etc. Y no siempre ofrece valores aceptables. Cuando estos parecen serlo el resultado es similar a la valoración de Chin-Kondner.

El método de Davisson permite un equilibrio entre los dos grupos de interpretaciones descritas. Por un lado muestra mejora de los valores cuando el terreno es más competente, y por otro lado mantiene los asientos siempre acotados a menos de 20 mm.

Las preestimaciones de los valores que han de arrojar los ensayos de carga estática en pilotes de gran diámetro como los tratados se podrán hacer según:

**• Carga última (Chin-Kondner)**

– Método CPTU directo

$$qp=0{,}66*qc$$

$$t_f = f_s \ (\leq 110 \text{ Kpa})$$

$$fs \approx 0{,}0286*qt$$

– Método Presiométrico tipo OYO

$$qp=1{,}1*Pl^*_{OYO}$$

$$\tau_f = \frac{qp}{24} < 110_Kpa$$

$$(\tau_f = 0{,}045 Pl^*)$$

– Métodos de "cota". (L/D>5)

$$qp=9*Su$$

$$\tau_f = Su * \alpha$$

$$\alpha \approx 0{,}78-0{,}069 LN(Su) \text{ (Kpa)}$$

**• Carga fluencia (Normativa polaca y Vesic-63)**

– Método CPTU directo

$$qp \text{ (Kpa)} = 1095+500 \ LN(qt) \text{ (Mpa)}$$

$$\tau \text{ (Kpa)} \approx 29{,}7+11{,}25 \ LN(qt) \text{ (Mpa)}$$

– Método Presiométrico tipo OYO

$$qp \text{ (Kpa)} = 1095+500 \ LN(1{,}7*Pl^*) \text{ (Mpa)}$$

$$\tau \text{ (Kpa)} \approx 29{,}7+11{,}25 \ LN(1{,}7*Pl^*) \text{ (Mpa)}$$

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Wael N. Abd Elsamee. Faculty of Engineering, Sinai University, El Arish, Egypt 2012. "EVALUATION OF THE ULTIMATE CAPACITY OF FRICTION PILES".

Fellinius, Bengt H. 2009-march. "BASICS OF FOUNDATION DESIGN". Electronic Edition.

G.E: Abdelrahman, E.M. Shaarawi, and K.S. Abouzaid. "INTERPRETATION OF AXIAL PILE LOAD TEST RESULTS FOR CONTINUOS FLIGHT AUGER PILES". Proc. Of the 9 Arab Structural Engineering Conf. Nov. 29-Dec. 1,2003, Abu Dhabl, UAE.

Test Method Nev.T600B, Effective August 12,1996. State of Nevada Departament of Transportation Materials Division. "METHOD OF TEST FOR THE DETERMINATION OF STATIC AXIAL LOAD CARRYING CAPACITY OF FOUNDATION PILES".

Chin, F.K. (1970). "ESTIMATION OF ULTIMATE LOAD OF PILES NOT CARRIED TO FAILURE", Proc. 2nd Southeast Asian Conference On Soil Eng. Singapore, 81-90.

Sámano A. A., ICA Fluor Daniel , Paniagua W. I., Pilotec , Ibarra E., inGeum ingeniería. "PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICAS Y DINÁMICAS EN PILAS Y PILOTES PARA UNA REFINERÍA EN MINATITLÁN, VERACRUZ: COMPARACIONES DE DISEÑO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES".

Dasley Soto Luis. Estudiante 5to año Ingeniería Civil. "DISEÑO DE CIMENTACIONES SOBRE PILOTES. ESTADO DEL ARTE".

Msc. Ing. Gustavo A. Coímbra G. c.PhD. "PRUEBAS DE CARGA EN PILOTES Y SU ANÁLISIS REAL EN CIMENTACIONES PILOTEADAS".

## 9. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a DRAGADOS SA. La oportunidad que nos ha dado para analizar todos estos ensayos. Especialmente a Juan Manuel Ruiz, Germán Martínez y Albert Pérez.

# Pérdidas de energía del flujo en medios granulares

ÁNGEL LARA DOMÍNGUEZ (*), RAFAEL COBO RAYÁN (**), Mª PILAR VIÑA GÓMEZ (***)
y FRANCISCO GARCÍA SÁNCHEZ (****)

**RESUMEN** En los estudios de filtración de un fluido como el agua a través de un medio granular permeable, se suele utilizar la fórmula de Ergun para determinar la ley de resistencia que determina dicha filtración.
En el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX), se han realizado una serie de ensayos de permeabilidad con materiales de gran tamaño para determinar el gradiente hidráulico de los mismos y compararlo con el valor proporcionado por Ergun.
Se analiza igualmente la mejor adecuación de la porosidad efectiva frente a la porosidad total en el cálculo del gradiente hidráulico.
El análisis de los ensayos realizados ha puesto de manifiesto que a partir de valores de D50 superiores a 10 mm y para caudales comprendidos entre 1 l/s y 10 l/s, el gradiente hidráulico obtenido se diferencia progresivamente más del gradiente obtenido mediante la fórmula de Ergun, acotándose así un rango superior de aplicabilidad de dicha fórmula.

## ENERGY LOSS OF FLOW IN GRAINED MEDIUM

**ABSTRACT** *In studies of filtering a fluid like water through a grained permeable material, the Ergun's formula to determine the resistance law –which states the filtration– is usually used.*
*In the Hydraulic Laboratory of the Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX), a series of permeability essays with large-sized materials have been carried out to determine their hydraulic gradient and compared it to the value provided by Ergun.*
*In the calculation of the hydraulic gradient, the fact of using the effective porosity instead of the total porosity, is also discussed. The analysis of the tests has shown that for D50 values greater than 10 mm and for flows ranging from 1 l/s to 10 l/s, the hydraulic gradient of the tests is gradually lower than the gradient obtained by the Ergun's formula, limiting thus a superior range of applicability of this formula.*

***Palabras clave:*** Material granular, Porosidad efectiva, Gradiente hidráulico, Ensayos en permeámetro.

***Keywords:*** Grained material, Effective porosity, Hidraulic gradient, Permeameter test.

## 1. INTRODUCCIÓN

El trabajo sintetizado en este artículo se enmarca dentro del proyecto "Métodos numéricos y experimentales para la evaluación de la seguridad y protección de las presas de materiales sueltos en situación de sobrevertido" desarrollado conjuntamente por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).

El objetivo del proyecto es la caracterización del proceso de rotura de las presas de materiales sueltos por sobrevertido, centrando el esfuerzo en la caracterización de la rotura completa de la presa, incluyendo el colapso del elemento impermeable, ya sea éste un núcleo de arcilla o una pantalla asfáltica o de hormigón. Este análisis resulta indispensable para llegar a obtener criterios aplicables para el cálculo de los hidrogramas de rotura que se ha de realizar, según la normativa vigente, en todas las grandes presas existentes en España

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Consejero Técnico. Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
E-mail: Angel.Lara@cedex.es

(**) Licenciado en Ciencias Geológicas. Director de Programa. Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
E-mail: Rafael.Cobo@cedex.es

(***) Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Investigadora. Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

(****) Ingeniero Técnico Agrícola. Jefe Sección Técnica. Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
E-mail: Francisco.G.Sanchez@cedex.es

El análisis de las causas de la rotura debe permitir disponer de datos suficientes para desarrollar una metodología de construcción de protecciones económicas que palien o eviten por completo la ruina de la presa ante episodios de sobrevertido. Con ello se podrá cumplir con los nuevos criterios vigentes en España sobre el diseño de aliviaderos, y estar mejor preparados para afrontar el aumento de la importancia y magnitud de los eventos de precipitación extrema que es una de las principales consecuencias del cambio climático según el último informe del IPCC (International Panel on Climatic Change).

El proyecto general se subdividió en tres subproyectos: BIAS2010-21350-C03-01 realizado por el CIMNE que sería el organismo encargado de implementar un modelo numérico; BIAS2010-21350-C03-02 desarrollado por el CEDEX que consistía en realizar los ensayos en modelos físicos reducidos necesarios y suficientes para calibrar y validar el modelo matemático y BIAS2010-21350-C03-03 desarrollado por la ETS de ICCP (UPM) que tenía como objetivo diseñar y ensayar las protecciones de pie de presa necesarias para minimizar los daños provocados por el sobrevertido. También realizarían ensayos en modelo físico reducido para complementar los realizados por el CEDEX.

## 2. MODELO DE FILTRACIÓN. LA ECUACIÓN DE ERGUN

En el modelo matemático se comenzó estudiando el proceso de filtración del agua a través del material de la presa; a continuación, mediante otro módulo, se modelizó la deformación del espaldón de aguas abajo y, por último, se procedió a realizar el modelo acoplado de ambos módulos.

La ley de resistencia empleada en un principio en el modelo matemático para la simulación del fenómeno de filtración corresponde a la definida por la ecuación de Ergun, que mide la pérdida de presión de un fluido que pasa a través de un volumen de material sólido granular. Este material granular se puede caracterizar con las siguientes magnitudes:

- $\varepsilon$ = porosidad, expresada como Vh/Vt.
  - $V_h$ = volumen de huecos.
  - $V_t$ = volumen total.
- $\phi$ = esfericidad de las partículas = $S_e/S_p$.
  - $S_e$ = superficie de una esfera de igual volumen que la partícula.
  - $S_p$ = superficie de la partícula.
- $d_p$ = tamaño de la partícula = diámetro de la misma si es esférica.

para partículas no esféricas:

$d_p = \phi\, d_e$.

siendo $d_e$ = diámetro equivalente.

La resistencia que se opone al paso del flujo a través de las partículas sólidas es la resultante del rozamiento total de todas las partículas y el rozamiento total por unidad de área es igual a la suma de dos fuerzas: fuerzas de rozamiento viscoso y fuerzas de rozamiento turbulentas.

Se supone que en todos los casos se dan las siguientes circunstancias:

- Las partículas están dispuesta al azar.
- Todas las partículas tienen el mismo tamaño y forma.
- Los efectos de pared son despreciables.

en este caso la expresión de Ergun es:

$$\Sigma F = \frac{150\mu u_0 L}{d_p^2 \rho}\,\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1{,}75 u_0^2 L}{d_p}\,\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \qquad [1]$$

donde el primer término de la suma expresa la pérdida debida a las fuerzas de rozamiento viscoso y el segundo término de la suma, la pérdida debida a las fuerzas turbulentas.

$\rho$ = Densidad del fluido.
$\mu$ = Viscosidad dinámica del fluido.
Se puede utilizar la viscosidad cinemática haciendo $\upsilon = \mu/\rho$.
$d_p$ = Diámetro de la partícula.
L = Distancia recorrida por el fluido.
$\varepsilon$ = Porosidad del material.
$u_0$ = Velocidad del fluido si no existiesen sólidos.
$u_0$ = Q/S aprox = velocidad de Darcy.
Q = Caudal.
S = Sección.

La pérdida de presión correspondiente sería:

$$\Delta P = \rho \sum F \qquad [2]$$

Para números de Reynolds menores de 20, se puede despreciar el término turbulento y para números de Reynolds mayores de 1000, se puede despreciar el término viscoso.

Si pasamos el parámetro L de la ecuación [1] al primer término de la ecuación [2], y suponiendo la densidad para el caso del agua igual a 1, podemos suponer que:

$$\frac{\Sigma F}{L} = \frac{\Delta P}{L} = \text{gradiente hidráulico (i)} \qquad [3]$$

siempre que se mantenga invariable el caudal y el material no se mueva.

Si expresamos los dos términos de la ecuación [1] en función de la velocidad $u_0$, agrupando el resto de parámetros en uno sólo tendremos:

$$A = 150\,\frac{\mu(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \rho \varepsilon^3} \qquad [4]$$

$$B = 1{,}75\,\frac{1-\varepsilon}{d_p \varepsilon^3} \qquad [5]$$

Sustituyendo las expresiones [3], [4] y [5] en la expresión [1] ésta adopta la forma:

$$i = Av + Bv^2 \qquad [6]$$

donde:

i = Gradiente hidráulico.
v = Velocidad del flujo.
A, B = Coeficientes de Ergun.

## 3. DISCUSIÓN DE ALGUNOS DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE ERGUN

### 3.1. DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS

En condiciones de trabajo reales es imposible que las partículas detríticas (clastos) cumplan las condiciones de Ergun y que todas sean esferas del mismo tamaño. De hecho en todos los materiales empleados en los ensayos se da una dispersión de tamaños en torno a un valor medio y una variedad de formas consecuencia del machaqueo en cantera de los mismos.

En estan condiciones, el tamaño de un clasto sería el valor medio de todas sus dimensiones, siendo este valor medio el correspondiente al diámetro de la esfera de Udden, es decir a una esfera que tuviera el mismo volumen que el clasto. El diámetro de dicha esfera recibe el nombre de diámetro equivalente ($d_e$). Dado que medir todas las dimensiones de un clasto resulta imposible en la práctica, se suelen utilizar diferentes metodologías en función del tamaño de los clastos. En

el rango de tamaños que se tenían previsto utilizar lo más adecuado era obtener el valor medio de su longitud, anchura y espesor máximos, medidos de forma ortogonal, aunque no se corten en un mismo punto. No obstante, el gran número de muestras que había que determinar y el gran tamaño de las mismas implicaba la necesidad de medir un número muy elevado de clastos para garantizar la representatividad del valor obtenido.

Se decidió utilizar un sistema más efectivo para determinar directamente el diámetro equivalente ($d_e$). Puesto que los materiales procedían de la misma cantera y eran todos del mismo tipo de caliza, se procedió a calcular la densidad de dicho material. Una vez realizadas las pruebas oportunas esta densidad resultó ser de 2,57 t/m$^3$. Pesando cada clasto con suficiente precisión, se puede calcular el volumen del mismo y a partir del mismo el diámetro de la esfera equivalente, es decir $d_e$.

$$V = \frac{P}{\delta}$$

donde:

V = Volumen de la esfera equivalente (cm$^3$).
P = Peso del clasto (g).
δ = Peso específico del clasto (g/cm$^3$).

Dado que,

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

entonces:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3\left(\frac{P}{\delta}\right)}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3P}{2{,}57}{12{,}57}}$$

Finalmente se establece:

$$d_e = \sqrt[3]{0{,}093\,P}$$

A partir de los diferentes valores obtenidos se puede calcular fácilmente el percentil $D_{50}$ cuyo valor será el que emplearemos en la fórmula de Ergun.

### 3.2. POROSIDAD DEL MATERIAL

La porosidad es la medida del volumen de espacios huecos en una roca:

$$Porosidad = \left(\frac{volumen\ de\ hue\cos}{volumen\ total}\right)x100$$

La porosidad se expresa como ε, ϕ o como $n$ y recibe el nombre de porosidad total. Se puede expresar en % o en 'tanto por uno', pero en cualquier caso es adimensional.

Se pueden definir varios tipos de porosidad según la conexión de sus poros:

- Conectada: poros conectados por un sólo lado.
- Interconectada: poros conectados por varios lados.
- Aislada: poros sin conexión entre sí.

También se puede definir una porosidad eficaz que es el volumen de agua drenada por gravedad con respecto al volumen total.

$$\phi_e = \left(\frac{volumen\ de\ agua\ drenada}{volumen\ total}\right)x100$$

Se puede dar algún tipo de confusión con los términos ingleses *specific yield* y *effective porosity*. Ambos términos están relacionados con el volumen de agua que podemos obtener de un medio poroso saturado. *Specific yield* se traduce como 'rendimiento específico' y sería equivalente a lo que hemos definido como 'porosidad eficaz'. *Effective porosity* o 'porosidad efectiva' sería la sección disponible para la circulación del agua. En la práctica ambos términos se dan como equivalentes aunque no expresan lo mismo, pero en definitiva el agua que queda adherida a los granos y no se mueve por gravedad determina la porosidad eficaz y la disminución de la sección del poro y por tanto de la porosidad efectiva.

En el laboratorio es fácil medir la porosidad eficaz, pero no existe un método experimental para obtener el valor de la porosidad efectiva. Por ello se acostumbra a dar el mismo valor numérico a ambas.

En general, la porosidad total ($\phi_t$) está en relación inversa con el tamaño de grano. A mayor tamaño de grano, el tamaño de los poros es mayor, pero su número es pequeño y, por tanto, el volumen total de poros es pequeño. A menor tamaño de grano, el tamaño de los poros es menor, pero su número es mayor y, por tanto, el volumen total de poros es grande.

Asímismo, en general, la porosidad eficaz ($\phi_e$) está en relación directa con el tamaño de grano. A mayor tamaño de grano mayor porosidad eficaz y a menor tamaño de grano, menor porosidad eficaz. Esto es así porque a menor tamaño de grano, para un mismo volumen, la superficie total granular es mayor y retiene una mayor cantidad de agua.

Como resultado de aplicar los conceptos anteriormente explicados a un medio granular poroso, parece justificado diferenciar, entre porosidad total y porosidad efectiva:

- La porosidad total es un valor adecuado para definir el volumen total de huecos que hay por unidad de volumen.
- La porosidad eficaz parece un valor más adecuado para utilizar en medios saturados o por los que circula agua. En este caso siempre se cumplirá que la porosidad total es mayor que la eficaz, puesto que una parte mayor o menor de agua quedará adherida a la superficie de las partículas granulares tanto por adherencia como por capilaridad (Figura 1). La consecuencia es que la sección a través de la que el agua puede fluir se ve reducida y por tanto habrá una mayor dificultad para la circulación del agua; es decir, disminuye la permeabilidad.

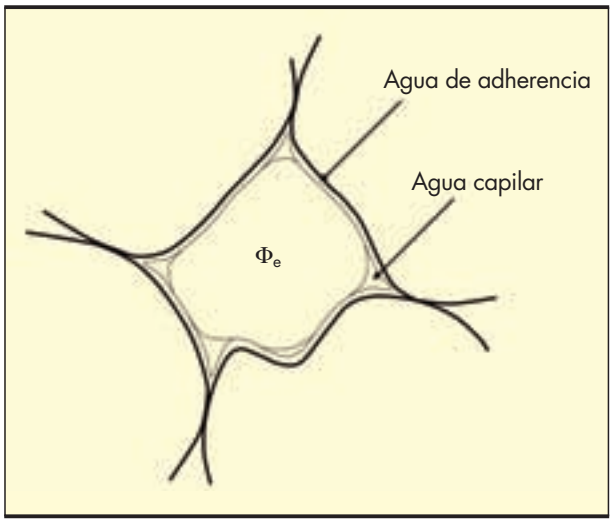



**FIGURA 1.** Distribución del agua en el interior de un poro.

| $D_{50}$ | $\phi_t$ | $\phi_e$ | $\phi_t - \phi_e$ |
|---|---|---|---|
| 10 mm (con buena selección) | 46,68% | 40,74% | 5,94% |
| 12 mm (con buena selección) | 44,00% | 40,60% | 3,40% |
| 12 mm (con mala selección) | 45,17% | 40,76% | 4,41% |
| 20 mm (uniforme) | 43,30% | 39,12% | 4,20% |
| 35 mm (uniforme) | 44,99% | 41,33% | 3,66% |
| 35 mm (con buena selección) | 45,60% | 42,70% | 2,90% |
| 50 mm (bien seleccionado) | 44,50% | 43,40% | 1,10% |

**TABLA 1.** Valores de la porosidad total y efectiva para diversos tamaños de clasto.

### 3.3. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA POROSIDAD EFECTIVA

Para obtener experimentalmente el valor de la porosidad efectiva en cada uno de los materiales de ensayo, se procedió a disponer de un depósito de volumen fijo y determinado ($V_d$), descubierto por su parte superior y provisto de una dispositivo para la salida del agua en su parte inferior. En primer lugar se llenaba el depósito con el material granulométrico y se medía el volumen de agua que entraba en el depósito que es el volumen total de huecos ($V_h$)

La porosidad total ($\phi_t$) será:

$$\emptyset_t = 100\frac{V_h}{V_d}$$

A continuación se vacía el depósito midiendo el volumen extraído ($V_e$). La porosidad eficaz ($\phi_e$) será:

$$\emptyset_e = 100\frac{V_e}{V_d}$$

En la Tabla 1 se presentan algunos de los resultados obtenidos.

A la vista de estos valores queda patente que, aunque la porosidad total siempre es mayor que la porosidad efectiva, conforme aumenta el tamaño de los clastos, esta diferencia es menor. Esto es debido a que conforme aumenta el tamaño, la superficie específica es cada vez menos influyente.

## 4. CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO (i) A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE ERGUN

A partir de las ecuaciones [4], [5] y [6] e introduciendo $g$ a efectos dimensionales y para contemplar la pérdida de presión en metros de columna de agua, se tiene:

$$A = 150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\vartheta}{gD_{50}^2}$$

$$B = 1{,}75\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}\frac{1}{gD_{50}}$$

donde:

$\varepsilon$ = porosidad efectiva.

$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} = 10^{-6}$ m$^2$/s.

$g$ = Aceleración de la gravedad.

$D_{50}$= Tamaño de las partículas.

y podemos calcular los coeficientes $A$ y $B$ y el gradiente hidráulico $i$ para los diferentes materiales (Tabla 2).

El valor de la velocidad $v$ depende del caudal de agua circulante. En los casos ensayados (ver apartado 5.1), se emplearon caudales comprendidos entre 1 l/s y 10 l/s. Los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 3

## 5. CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO A PARTIR DE ENSAYOS

Para poder validar los resultados proporcionados por la fórmula de Ergun empleada en el modelo numérico, se construyó un equipo de ensayo de gran tamaño con el que poder determinar de forma experimental el gradiente hidráulico de los materiales utilizados en la experimentación.

### 5.1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

El equipo consta de tres tubos cilíndricos (Figura 2) de 388 mm de diámetro interior y 2 m de longitud. La muestra se situa rellenando completamente el tubo intermedio. En el tubo de la izquierda, el agua entra a través de un conducto perforado que garantiza que llega a la muestra sin turbulencias. Hay siete puntos de medida de la presión hidráulica: uno en la zona de entrada de agua, cinco a lo largo del tubo de muestra y uno en la zona de salida de agua (Figura 3).

| *dp* (m) | $\varepsilon$ | *A* | *B* | *i* |
|---|---|---|---|---|
| 0,010 | 0,4074 | 0,7949 | 156,4986 | $0{,}7949v + 156{,}4986v^2$ |
| 0,020 | 0,3983 | 0,2192 | 85,0220 | $0{,}2192v + 25{,}022v^2$ |
| 0,035 | 0,4133 | 0,0609 | 42,3998 | $0{,}0609v + 42{,}3998v^2$ |
| 0,045 | 0,4339 | 0,0297 | 27,4994 | $0{,}0297v + 27{,}4994v^2$ |

**TABLA 2.** Cálculo de los coeficientes *A* y *B* y el gradiente *i*.

| Q (l/s) | v (m/s) | $D_{50}$ =10 mm | $D_{50}$ = 20 mm | $D_{50}$=35mm | $D_{50}$=45mm |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Gradiente hidráulico | | | |
| 1 | 0,0085 | 0,0179 | 0,0079 | 0,0035 | 0,0022 |
| 2 | 0,0169 | 0,0582 | 0,0280 | 0,0132 | 0,0084 |
| 3 | 0,0254 | 0,1209 | 0,0603 | 0,0288 | 0,0185 |
| 4 | 0,0338 | 0,2060 | 0,1047 | 0,0506 | 0,0325 |
| 5 | 0,0423 | 0,3135 | 0,1613 | 0,0784 | 0,0504 |
| 6 | 0,0507 | 0,4433 | 0,2301 | 0,1123 | 0,0723 |
| 7 | 0,0592 | 0,5956 | 0,3110 | 0,1522 | 0,0981 |
| 8 | 0,0677 | 0,7702 | 0,4041 | 0,1982 | 0,1279 |
| 9 | 0,0761 | 0,9673 | 0,5093 | 0,2503 | 0,1616 |
| 10 | 0,0846 | 1,1867 | 0,6267 | 0,3084 | 0,1992 |

**TABLA 3.** Valores del gradiente hidráulico en función del caudal y del tamaño del material.

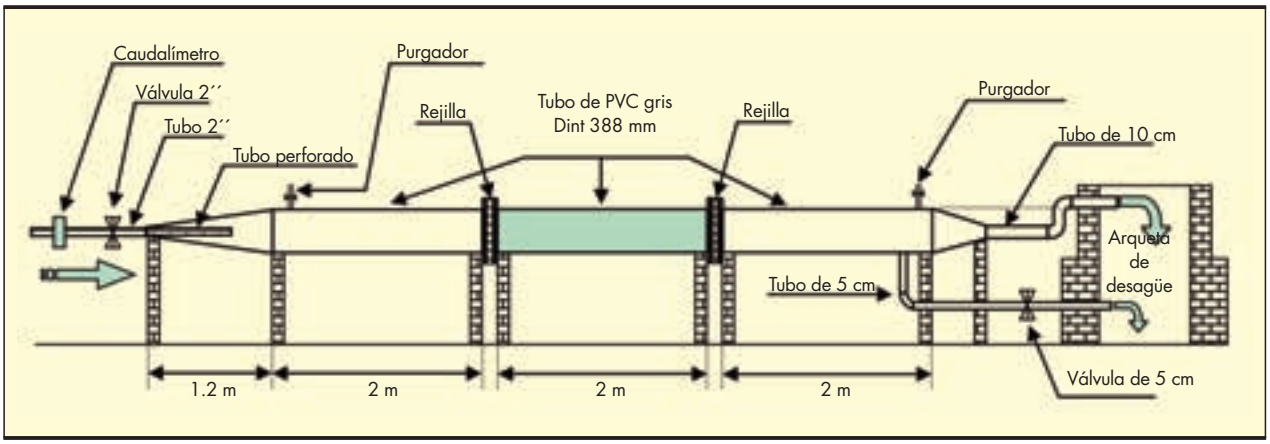



**FIGURA 2.** Esquema del equipo de ensayo.

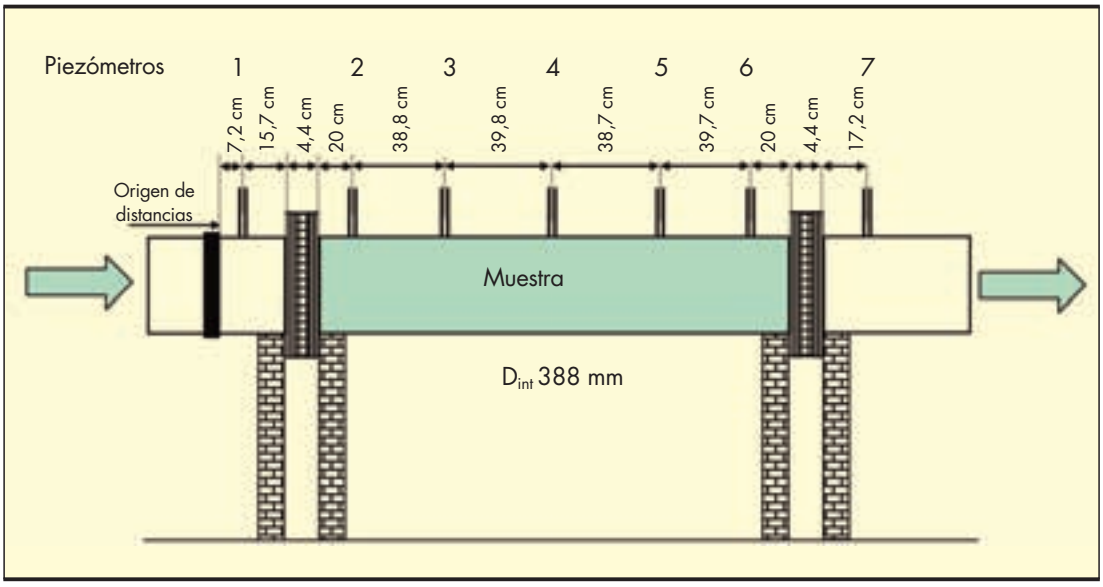



**FIGURA 3.** Posición de los puntos de medida de presión.

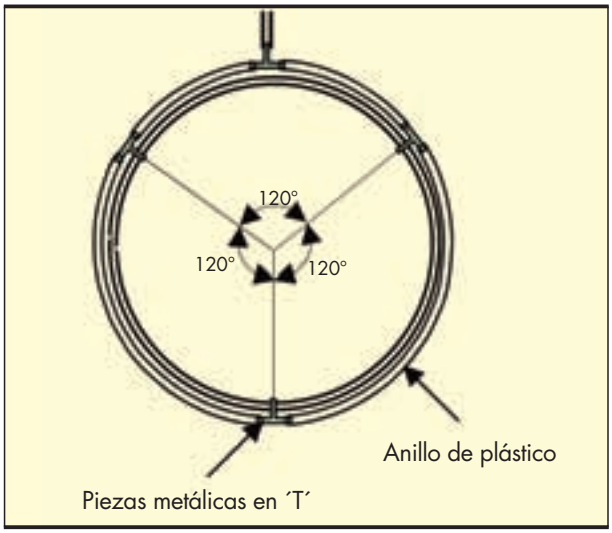



**FIGURA 4.** Diseño de medida de presión en una sección transversal.

Para garantizar la fiabilidad de las medidas, la presión registrada es la media de la existente en tres puntos equidistantes de la sección transversal en la que se realiza la medida (Figura 4).

Los materiales ensayados tenían un $D_{50}$ de 10, 20, 35 y 45 mm y los caudales variaban de 1 l/s a 10 l/s, en intervalos de 1 l/s.

## 5.2. ENSAYOS

Se han realizado ensayos con los materiales que aparecen reflejados en la Tabla 4. El rango de caudales utilizados fue de 1 l/s a 10 l/s, aunque en algunos ensayos no se pudieron obtener resultados para todo el rango de caudales.

Se presentan a continuación los gráficos correspondientes. En el eje X se representa la distancia desde un punto "cero" de las diferentes tomas de presión (Figura 3) y en el eje Y se representa la presión en cm de altura de agua. En cada uno de los gráficos las correlaciones obtenidas para cada caudal son superiores al 99%. El gradiente hidráulico para cada caudal viene dado por la pendiente de la recta correspondiente.

**FIGURA 5.** Aspecto del permeámetro en las primeras fases de ensayo. La parte central es de PVC y las presiones se miden mediante tubos piezométricos.

**FIGURA 6.** En una segunda fase se sustituyó el tubo de muestra por uno de acero inoxidable, se aumentaron los puntos de medida y se colocaron captores automáticos de presión.

**FIGURA 7.** Bomba impulsora, caudalímetro y lectores de presión digitales.

| Material de 10 mm | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distancia (cm) | Q = 7 (l/s) | Q = 6 (l/s) | Q = 5 (l/s) | Q = 4 (l/s) | Q = 3 (l/s) | Q = 2 (l/s) | Q = 1 (l/s) |
| 47,30 | 147,80 | 118,60 | 94,80 | 72,95 | 56,00 | 41,90 | 32,05 |
| 86,10 | 129,95 | 104,15 | 84,45 | 66,05 | 51,50 | 39,90 | 31,45 |
| 125,90 | 106,60 | 86,70 | 71,50 | 57,10 | 46,50 | 37,60 | 30,65 |
| 164,60 | 81,05 | 67,95 | 57,50 | 48,40 | 41,10 | 34,70 | 29,90 |
| 204,30 | 56,05 | 49,80 | 44,25 | 39,75 | 35,70 | 32,20 | 28,90 |

| Material de 20 mm | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distancia (cm) | Q = 10 (l/s) | Q = 9 (l/s) | Q = 8 (l/s) | Q = 7 (l/s) | Q = 6 (l/s) | Q = 5 (l/s) | Q = 4 (l/s) | Q = 3 (l/s) | Q = 2 (l/s) |
| 47,30 | 152,75 | 133,90 | 108,50 | 84,50 | 64,10 | 47,30 | 30,80 | 18,75 | 9,00 |
| 86,10 | 137,75 | 102,75 | 91,75 | 71,35 | 54,05 | 40,00 | 26,05 | 15,75 | 7,50 |
| 125,90 | 107,05 | 87,25 | 70,6 | 55,20 | 41,95 | 31,05 | 20,55 | 12,50 | 5,90 |
| 164,60 | 76,65 | 63,10 | 51,00 | 39,80 | 30,55 | 22,65 | 15,80 | 9,50 | 4,40 |
| 204,30 | 42,1 | 34,80 | 28,40 | 22,30 | 17,25 | 13,00 | 8,90 | 5,60 | 2,80 |

| Material de 35 mm | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distancia (cm) | Q = 10 (l/s) | Q = 9 (l/s) | Q = 8 (l/s) | Q = 7 (l/s) | Q = 6 (l/s) | Q = 5 (l/s) | Q = 4 (l/s) | Q = 3 (l/s) | Q = 2 (l/s) | Q = 1 (l/s) |
| 47,30 | 96,40 | 84,25 | 72,90 | 62,95 | 54,90 | 47,70 | 41,10 | 35,85 | 31,80 | 27,80 |
| 86,10 | 85,25 | 75,20 | 65,65 | 57,50 | 50,30 | 44,70 | 39,20 | 34,80 | 31,20 | 27,70 |
| 125,90 | 76,00 | 67,45 | 59,55 | 52,80 | 47,00 | 42,25 | 37,60 | 33,80 | 30,80 | 27,60 |
| 164,60 | 68,20 | 61,40 | 55,10 | 49,10 | 44,45 | 40,35 | 36,50 | 33,00 | 30,40 | 27,55 |
| 204,30 | 59,75 | 54,25 | 49,00 | 44,75 | 40,90 | 37,80 | 34,70 | 32,30 | 30,10 | 27,50 |

| Material de 45 mm | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distancia (cm) | Q = 10 (l/s) | Q = 9 (l/s) | Q = 8 (l/s) | Q = 7 (l/s) | Q = 6 (l/s) | Q = 5 (l/s) | Q = 4 (l/s) | Q = 3 (l/s) | Q = 2 (l/s) | Q = 1 (l/s) |
| 47,30 | 92,05 | 83,40 | 75,85 | 69,55 | 63,85 | 59,30 | 54,70 | 50,90 | 47,80 | 45,10 |
| 86,10 | 86,15 | 78,95 | 72,25 | 66,85 | 61,60 | 57,65 | 53,95 | 50,55 | 47,65 | 45,30 |
| 125,90 | 80,55 | 74,00 | 68,00 | 63,35 | 58,95 | 55,50 | 52,20 | 49,25 | 46,60 | 44,30 |
| 164,60 | 77,20 | 71,65 | 67,05 | 62,50 | 58,30 | 55,60 | 52,90 | 50,05 | 47,85 | 45,60 |
| 204,30 | 71,80 | 67,30 | 63,40 | 59,70 | 56,50 | 54,20 | 51,70 | 49,30 | 47,45 | 45,30 |

**TABLA 4.** Presión en cm de altura de columna de agua para diferentes caudales.

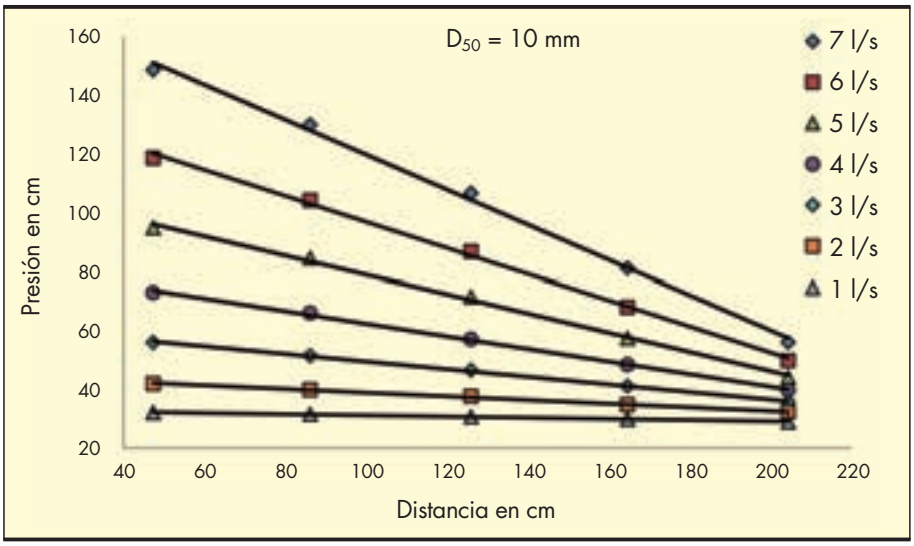



**FIGURA 8.** Correlación $\Delta P/\Delta L$ para material de 10 mm.

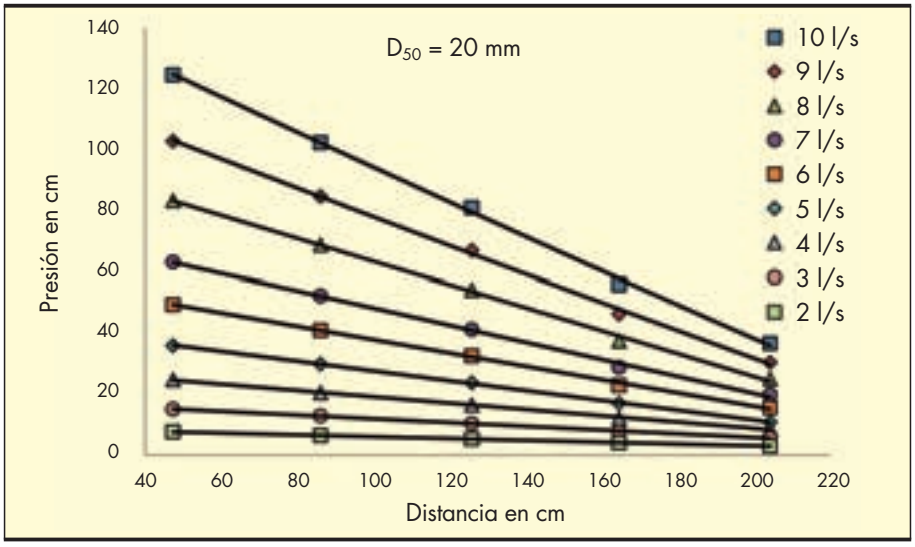



**FIGURA 9.** Correlación $\Delta P/\Delta L$ para material de 20 mm.

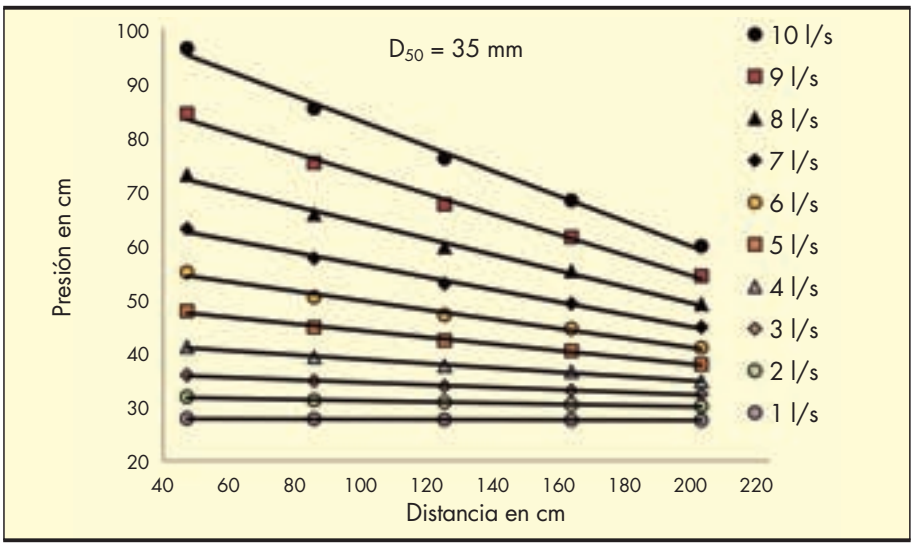



**FIGURA 10.** Correlación $\Delta P/\Delta L$ para material de 35 mm.

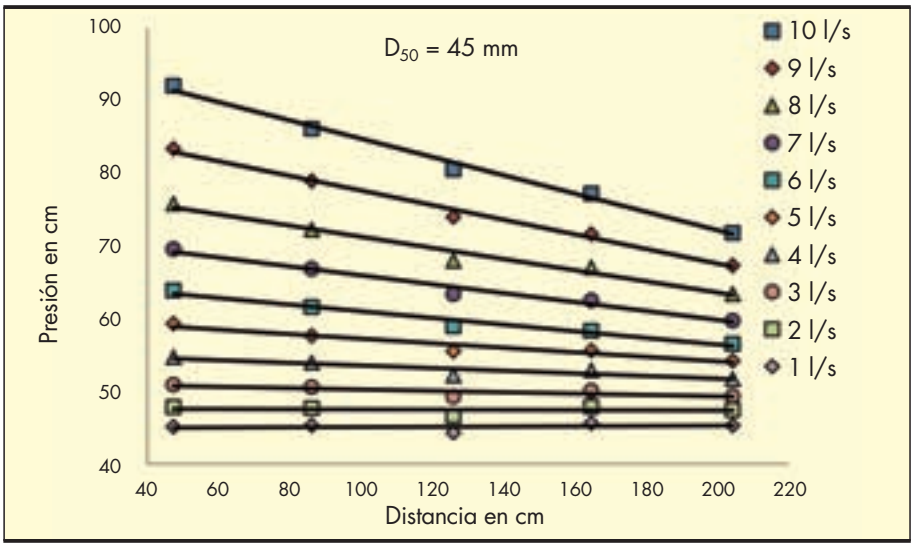



**FIGURA 11.** Correlación $\Delta P/\Delta L$ para material de 45 mm.

## 6. COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON ERGUN Y CON EL PERMEÁMETRO

Una vez realizados los ensayos y obtenido el valor del gradiente hidráulico de las diferentes muestras, se procedió a comparar los resultados con los obtenidos por aplicación de la fórmula de Ergun. Los resultados se dan en la Tabla 5.

Como puede observarse del análisis de los datos, los gradientes obtenidos para los materiales de 10 mm de tamaño son prácticamente iguales, pero a medida que aumenta el tamaño de las partículas la diferencia entre ambos valores se va incrementando, siendo el máximo el correspondiente a la muestra de 45 mm de tamaño de partículas. Las correspondientes gráficas de correlación entre ambas series de valores evidencian estas diferencias.

## 7. DIAGRAMA f-RE

A partir del gradiente hidráulico ($i$) se puede determinar el coeficiente o factor de fricción del material ($f$) y el número de Reynolds ($Re$) correspondiente mediante las siguientes expresiones:

$$f = \frac{i \cdot D_{50}}{\frac{v^2}{g}} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon}$$

donde:

$f$ = Coeficiente de fricción.
$D_{50}$ = Tamaño de las partículas.
$v$ = Velocidad del flujo.
$g$ = Aceleración de la gravedad.
$\varepsilon$ = Porosidad efectiva.

| | | Ergun | | | | Permeámetro | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q (l/s) | v (m/s) | D50 = 10 mm | D50 = 20 mm | D50= 35mm | D50= 45mm | D50 = 10 mm | D50 = 20 mm | D50= 35mm | D50= 45mm |
| 1 | 0,0085 | 0,0179 | 0,0079 | 0,0035 | 0,0022 | 0,0200 | | 7,0000E-06 | 0,0018 |
| 2 | 0,0169 | 0,0582 | 0,0280 | 0,0132 | 0,0084 | 0,0627 | 0,0301 | 0,0107 | 0,0013 |
| 3 | 0,0254 | 0,1209 | 0,0603 | 0,0288 | 0,0185 | 0,1299 | 0,0614 | 0,0227 | 0,0094 |
| 4 | 0,0338 | 0,2060 | 0,1047 | 0,0506 | 0,0325 | 0,2142 | 0,1039 | 0,0395 | 0,0180 |
| 5 | 0,0423 | 0,3135 | 0,1613 | 0,0784 | 0,0504 | 0,3263 | 0,1610 | 0,0615 | 0,0312 |
| 6 | 0,0507 | 0,4433 | 0,2301 | 0,1123 | 0,0723 | 0,4428 | 0,2183 | 0,0862 | 0,0459 |
| 7 | 0,0592 | 0,5956 | 0,3110 | 0,1522 | 0,0981 | 0,5967 | 0,2800 | 0,1141 | 0,0613 |
| 8 | 0,0677 | 0,7702 | 0,4041 | 0,1982 | 0,1279 | | 0,3758 | 0,1487 | 0,0767 |
| 9 | 0,0761 | 0,9673 | 0,5093 | 0,2503 | 0,1616 | | 0,4659 | 0,1880 | 0,1007 |
| 10 | 0,0846 | 1,1867 | 0,6267 | 0,3084 | 0,1992 | | 0,5659 | 0,2302 | 0,1260 |

**TABLA 5.** Valores del gradiente hidráulico para diversos caudales y tamaño de grano obtenidos a partir de la fórmula de Ergun y de ensayos en el permeámetro.

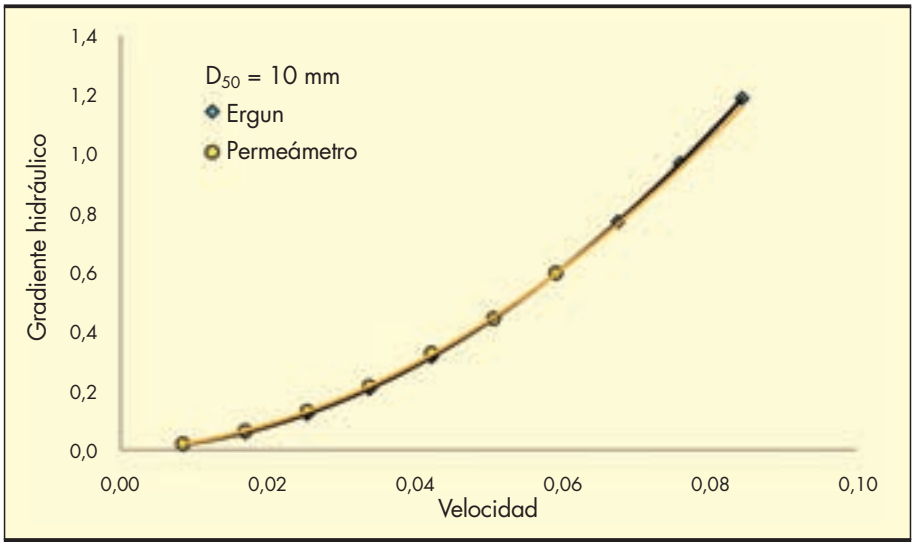



**FIGURA 12.** Comparación del gradiente hidráulico para material de 10 mm.

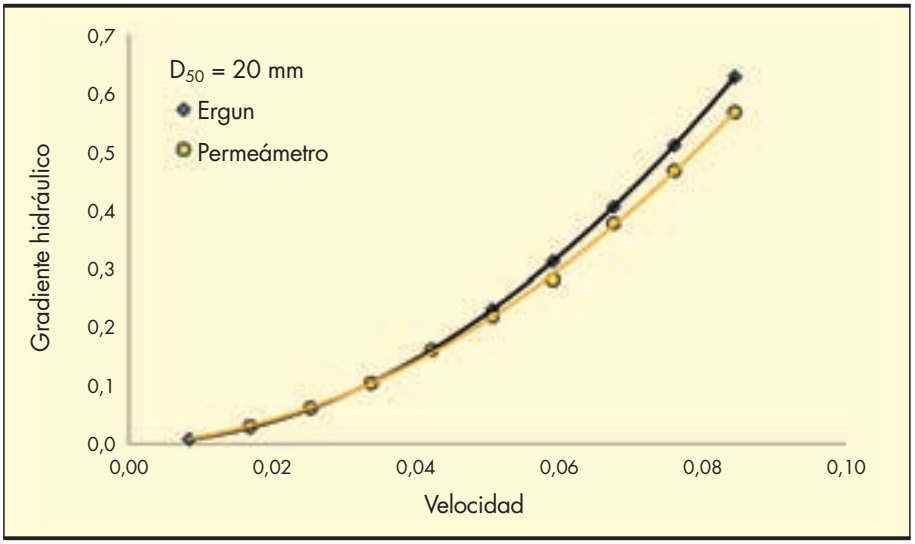



**FIGURA 13.** Comparación del gradiente hidráulico para material de 20 mm.

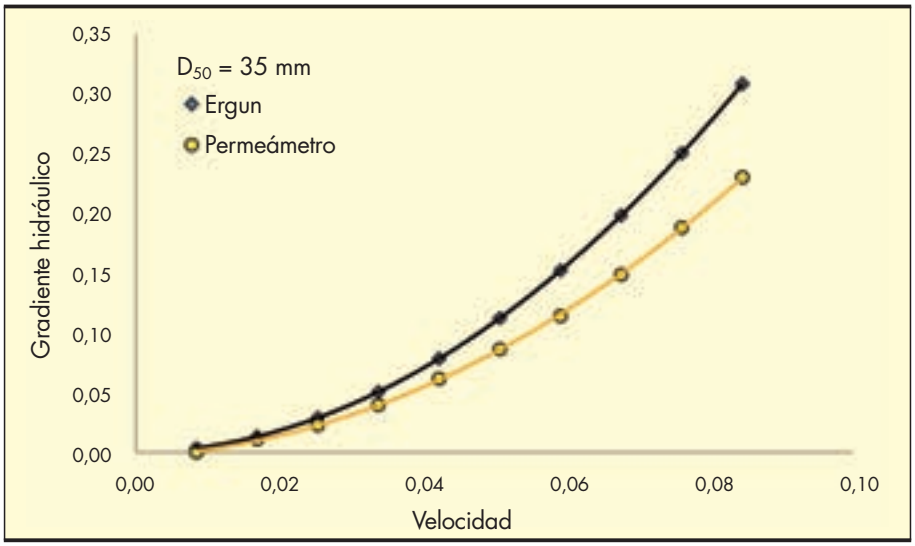



**FIGURA 14.** Comparación del gradiente hidráulico para material de 35 mm.

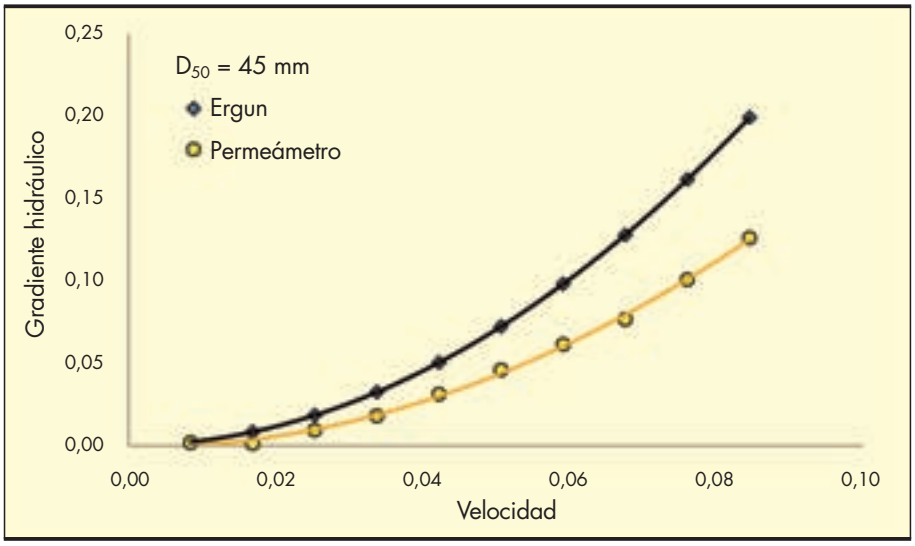



**FIGURA 15.** Comparación del gradiente hidráulico para material de 45 mm.

y;

$$Re = \frac{v \cdot D_{50}}{\vartheta} \cdot \frac{1}{1-\varepsilon}$$

donde:

$Re$ = Número de Reynolds.
$v$ = Velocidad del flujo.
$D_{50}$ = Tamaño de las partículas.
$\upsilon$ = Viscosidad cinemática del agua.
$\varepsilon$ = Porosidad efectiva.

Los resultados de aplicar ambas fórmulas a los datos de los ensayos se presentan en la Tabla 6.

El gráfico de la Figura 16 refleja las relaciones existentes entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds para diferentes tamaños de partículas y su comparación con el valor teórico relacionado con Ergun.

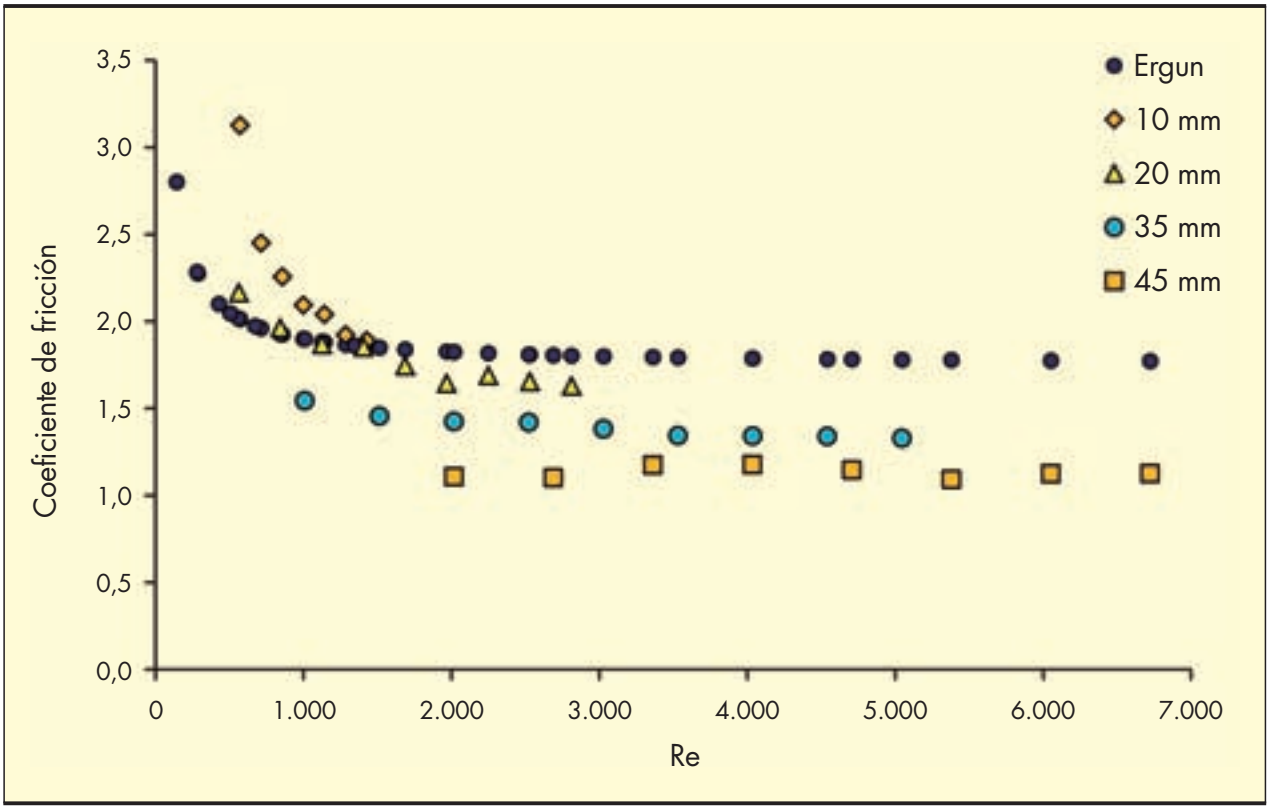



**FIGURA 16.** Relación f-Re para diferentes granulometrías.

| Re | f (Ergun) | f (permeámetro) |
|---|---|---|
| 142,720062 | 2,80100852 | |
| 285,440123 | 2,27550426 | |
| 428,160185 | 2,10033617 | |
| 570,880246 | 2,01275213 | 3,1265 |
| 713,600308 | 1,9602017 | 2,4504 |
| 856,320369 | 1,92516809 | 2,2563 |
| 999,040431 | 1,90014407 | 2,0928 |
| 1141,76049 | 1,88137606 | 2,0404 |
| 1284,48055 | 1,86677872 | 1,9228 |
| 1427,20062 | 1,85510085 | 1,8890 |
| 281,123179 | 2,28357393 | |
| 562,246359 | 2,01678697 | 2,1653 |
| 843,369538 | 1,92785798 | 1,9631 |
| 1124,49272 | 1,88339348 | 1,8686 |
| 1405,6159 | 1,85671479 | 1,8531 |
| 1686,73908 | 1,83892899 | 1,7449 |
| 1967,86225 | 1,82622485 | 1,6443 |
| 2248,98543 | 1,81669674 | 1,6896 |
| 2530,10861 | 1,80928599 | 1,6551 |
| 2811,23179 | 1,80335739 | 1,6284 |
| 504,543514 | 2,04729844 | |
| 1009,08703 | 1,89864922 | 1,5435 |
| 1513,63054 | 1,84909948 | 1,4553 |
| 2018,17406 | 1,82432461 | 1,4245 |
| 2522,71757 | 1,80945969 | 1,4194 |
| 3027,26108 | 1,79954974 | 1,3816 |
| 3531,8046 | 1,79247121 | 1,3436 |
| 4036,34811 | 1,78716231 | 1,3406 |
| 4540,89163 | 1,78303316 | 1,3392 |
| 5045,43514 | 1,77972984 | 1,3283 |
| 672,304519 | 1,97311318 | |
| 1344,60904 | 1,86155659 | |
| 2016,91356 | 1,82437106 | 1,1071 |
| 2689,21808 | 1,8057783 | 1,1009 |
| 3361,52259 | 1,79462264 | 1,1743 |
| 4033,82711 | 1,78718553 | 1,1763 |
| 4706,13163 | 1,78187331 | 1,1457 |
| 5378,43615 | 1,77788915 | 1,0912 |
| 6050,74067 | 1,77479035 | 1,1247 |
| 6723,04519 | 1,77231132 | 1,1254 |

**TABLA 6.** Valores del número de Reynolds y del coeficiente de fricción.

## 8. CONCLUSIONES

A la vista de los gráficos correspondientes a la gama de ensayos realizados, queda puesta de manifiesto la diferencia existente entre los resultados proporcionados por Ergun y los aquí obtenidos experimentalmente. Estas diferencias se acusan fundamentalmente para tamaños superiores a 10 mm y son mayores cuanto mayor es el caudal.

Parece claro que la fórmula de Ergun es aplicable en material detrítico granular hasta tamaños de 10 mm. A partir de este tamaño, se producen errores sistemáticamente mayores a medida que se aplica a partículas superiores a 10 mm.

Por otra parte, el coeficiente de fricción, para grandes valores de Re, no resulta ser una constante igual a 1,75 (como se deduce de la expresión de Ergun), sino que depende del diámetro del material, siendo menor cuanto mayor es $D_{50}$.

Resulta pues recomendable, para tamaños de partículas superiores a 10 mm, calcular de forma experimental el gradiente hidráulico, siempre que sea posible, ó, en caso contrario, tener en cuenta que los datos obtenidos mediante la fórmula de Ergun están siempre por encima de los valores experimentales.

## 9. BIBLIOGRAFÍA


Bravo, G., (1995) **Teoría y práctica de la filtración y drenaje en presas de materiales sueltos.** Madrid: Comité Nacional Español de Grandes Presas.

Brivios, O.; Bonelli, S.; Borghi, R. (2007) **Soil erosion in the boundary layer along a slope a theoretical study.** European Journal of Mechanics B/Fluids 26 (2007) 707-719.

Detert, M., Weitbrecht, V. y Jirka, G.H. (2010) **Laboratory Measurements on Turbulent Pressure Fluctuations in and above Gravel Beds**. *Journal of Hydraulic Engineering,* 136(10), pp. 779-789.

Hospital, R.B. (2009). **Posibilidades del método de elementos finitos y partículas (PFEM) en problemas de interacción fluido-estructura en flujos incompresibles**. Tesina de Investigación para obtener grado de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals, i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.

Odong, J. (2007). **Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis**. *Journal of American Science,* 3(3), pp. 54-60.

Parkin, Trollope y Lawson (1966) **Rockfill structures subject to water flow.** ASCE; Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division; November 1966.

Rojas, J.L. (2011) **Modelización numérica de la erosión de presas de materiales sueltos por sobrevertido, mediante el modelo de sistema de partículas y elemento finito (PFEM)**. Tesis para optar por el grado de Máster en Sistemas de Ingeniería Civil.

Toledo, M.A. (1997) **Presas de escollera sometidas a sobrevertido. Estudio del movimiento del agua a través de la escollera y de la estabilidad frente al deslizamiento en masa.** Tesis doctoral.,Universidad Politécnica de Madrid.

Volker (1969) **Nonlinear flow in porous media by finite elements.** ASCE; Journal of the Hydraulics Division; November 1969.

White, F. (1983). **Mecánica de Fluidos** 1ª ed. (Español). McGraw Hill Inc. Madrid, España.

# Predicción de la temperatura de los firmes de carretera a través de parámetros climáticos

**BELÉN CADAVID JÁUREGUI (*) y JAVIER PÉREZ AYUSO (**)**

**RESUMEN** Las propiedades físicas de los materiales que conforman el firme tienen una alta sensibilidad a los cambios de temperatura. Estos cambios en las propiedades físicas de los materiales, alteran el comportamiento de la estructura.
La predicción precisa del perfil de temperaturas del firme es de gran utilidad en su diseño y dimensionamiento, lo que ha originado una ingente cantidad de estudios e investigaciones desde los años 60 hasta la actualidad.
De la revisión de éstos, se aprecian dos enfoques en cuanto a la modelización de las temperaturas del firme, el primero consiste en obtener un modelo matemático capaz de predecir la distribución de la temperatura del firme en función del tiempo a partir de las ecuaciones del balance energético y la conducción del calor; en el segundo se obtiene un modelo de regresión, un modelo probabilístico, en el que a través de datos empíricos de temperatura de los firmes y datos climáticos, se relaciona la temperatura en el firme con los parámetros climáticos seleccionados.
En este trabajo se han abordado dos estudios, el primero de ellos es la validación de dos algoritmos desarrollados en base a las ecuaciones de balance energético para el cálculo de las temperaturas extremas, máximas y mínimas, en la superficie del firme y a diferentes profundidades; y el segundo se centra en el desarrollo de un modelo probabilístico a través de los datos obtenidos en la Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX, el denominado Modelo CEDEX. El objetivo ha sido relacionar la temperatura en el firme con las variables climáticas de temperatura ambiente y radiación solar, para obtener un método sencillo de predicción de la temperatura del firme a través de datos fácilmente accesibles.

## ASPHALT PAVEMENT TEMPERATURE PREDICTION USING CLIMATIC PARAMETERS

**ABSTRACT** *The physical properties of the materials that make up the pavement structure have a highly sensitivity to the temperature changes. These changes in the physical properties of the materials affect the performance and life span of the structure.*
*The accuracy of the pavement temperature profile predictions is very useful in the dimensional design of them, so that it has been conducted a huge amount of researches and studies from the 60's until nowadays.*
*After reviewing the most of them, it has indeed been noticed two pavement model approaches: the first one tries to estimate the temperature distribution in a pavement structure by using mathematical models based on energy balance equations and heat conduction equation; the second one is to obtain a regression model, probabilistic model, through field measurements of pavement temperatures and other climatic parameters in order to relate among them.*
*This paper presents two research studies: the first study was the validation of two algorithms developed to predict the maximum and minimum pavement temperatures not only at the pavement surface, but also at different depths inside the structure; the second one was focus on the development of a probabilistic pavement temperature model by means of the data collected in the CEDEX Test Track, called Modelo CEDEX. The main goal was to relate the pavement temperature to the climatic parameters of air temperature and global radiation to obtain a method for predicting pavement temperatures through easily available data.*

***Palabras clave:*** Temperatura, Radiación Global, Modelo, Mezcla bituminosa.

***Keywords:*** Temperature, Global Radiation, Model, Asphalt mixture.

(*) Licenciada en Ciencias Físicas. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Belen.cadavid@cedex.es
(**) Titulado de Escuelas Técnicas de Grado Medio de Organismos Autónomos del Ministerio de Fomento. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Javier.perez@cedex.es

## 1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas de los materiales que conforman el firme tienen una alta sensibilidad a los cambios de temperatura, sobre todo el módulo de las mezclas bituminosas (Elizondo *et al*., 2008). En el caso de estos materiales, con el aumento de la temperatura se produce una reducción de la viscosidad del betún, lo que provoca una reducción del módulo dinámico de las capas que forman la estructura (Whiffin *et al*., 1963). Por otro lado, debido a la oxidación del ligante de la mezcla, el módulo aumenta con el paso del tiempo. Estos cambios en las propiedades físicas de los materiales, alteran el comportamiento de la estructura bajo la aplicación de cargas dinámicas.

Durante la década de los 60 se realizaron muchos estudios relacionados con el comportamiento viscoelástico de las mezclas bituminosas y su dependencia con la temperatura (Kallas, 1966; Canadian Good Roads Association, 1963; Dorman, 1963; Jimenez *et al*., 1963; Monismith, 1959; Monismith, 1961; Monismith *et al*., 1963; Monismith *et al*., 1965; Pagen, 1967; Pell, 1963; Secor, 1965). Con estos estudios se hace patente la importancia de la temperatura en el comportamiento mecánico de las mezclas. Es por ello que para calcular los efectos térmicos en el firme y la respuesta térmica de las mezclas bituminosas, es necesario evaluar la evolución de la distribución diaria de la temperatura, a diferentes profundidades dentro del firme (Minhoto, 2005).

La predicción precisa del perfil de temperaturas del firme es de gran utilidad en su diseño y dimensionamiento. Hay que tener en cuenta el valor de la temperatura en el cálculo de la deflexión del firme, en el cálculo de los módulos mediante cálculo inverso, en la predicción de las heladas y su penetración, en cálculos del ritmo de enfriamiento de las capas recién extendidas y en los efectos del enfriamiento y calentamiento diurnos y estacionales.

Por todo lo expuesto anteriormente, desde los años 60, se ha tratado de obtener métodos y modelos matemáticos que permitan predecir la temperatura del firme a través de parámetros climáticos de fácil medida (Straub *et al*., 1968).

Entre 1987 y 1993 se llevó a cabo un programa de investigación en carreteras, denominado "*Strategic Highway Research Program*" (SHRP), en Estados Unidos y Canadá. Uno de los materiales estudiados fue la mezcla bituminosa, estableciendo un enfoque novedoso en su diseño, del cual se obtuvo como resultado un nuevo método de diseño denominado "*Superior Performing Asphalt Pavements*" (Superpave). Uno de los temas de estudio dentro de este método fue el comportamiento de las mezclas bituminosas con la temperatura, lo que permitió desarrollar modelos de predicción de la temperatura del firme en función de las condiciones climáticas. El objetivo era predecir las temperaturas máximas y mínimas a las que se verá sometida una mezcla al ser puesta en una localización climática concreta. Gracias a todas las investigaciones que se realizaron en este programa, se desarrollaron nuevas especificaciones para la obtención de mezclas bituminosas con mejores características que las existentes para su puesta en obra.

Este nuevo método de diseño, Superpave, incluye un procedimiento de clasificación de los ligantes denominado "*Performance Grade*" (PG), Grado de Funcionamiento. Este procedimiento propone un sistema de dos números asociado a cada tipo de ligante, que representan la mayor y menor temperatura del firme para las cuales el ligante mantiene sus propiedades y se comporta correctamente. El fin de este procedimiento de clasificación es asegurar que el ligante usado sea el apropiado para resistir las roderas a altas temperaturas y la fisuración a bajas temperaturas. Estas temperaturas máximas y mínimas son calculadas en base a datos climáticos locales, para las épocas más cálidas y frías del año respectivamente, a través de los modelos de predicción de las temperaturas desarrollados bajo este programa de investigación (SHRP). Muchos de los Departamentos de Transporte de Estados Unidos y Canadá han puesto en práctica, o están en ello, este nuevo método de diseño de mezclas bituminosas.

## 2. MODELOS MATEMÁTICOS DE PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL FIRME

Los modelos desarrollados para el cálculo de las temperaturas del firme a diferentes profundidades tienen varios propósitos:

- Ayudar en la estimación del módulo elástico de la mezcla, ya que éste varía con la temperatura.
- Predecir las temperaturas máximas y mínimas que soportará una mezcla bituminosa situada en un área climática específica, lo cual ayuda en el proceso de diseño de estas mezclas, es decir, en la selección del ligante y los áridos más adecuados para las temperaturas de trabajo, teniendo en cuenta los costes de los materiales.

Los modelos desarrollados para predecir las temperaturas se basan en el balance energético que tiene lugar en la superficie del firme.

Cuando dos cuerpos se encuentran a distintas temperaturas se produce entre ellos una transferencia de energía (denominada calor) que va del cuerpo con mayor temperatura al cuerpo con menor. Esta transferencia de energía se realiza a través de diferentes mecanismos.

Los tres mecanismos principales son:

- Conducción.
- Convección.
- Radiación térmica.

La conducción se produce a nivel atómico. Los átomos del cuerpo con mayor temperatura tienen mayor energía de vibración que los del cuerpo con menor temperatura. A base de choques entre ellos van transmitiendo esta energía hasta que se produce el equilibrio térmico.

La convección se produce en fluidos (líquidos o gases) mediante el desplazamiento de volúmenes a diferentes temperaturas debido a las corrientes de convección. Este desplazamiento se debe a la variación de la densidad del fluido con la temperatura. Al encontrarse un sólido en contacto con un fluido a diferente temperatura, se produce un gradiente de temperatura en el fluido provocando el movimiento de convección, de modo que transfiera la energía del volumen con mayor temperatura al volumen con menor temperatura.

La radiación térmica, es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Se trata de radiación electromagnética. Un cuerpo en equilibrio térmico emite la misma cantidad de radiación que la que absorbe.

Con los modelos de predicción de las temperaturas en el interior del firme, a partir de datos climatológicos y propiedades intrínsecas de la mezcla, se trata de estimar el perfil de temperaturas para un momento dado. Se supone que las temperaturas del interior de la mezcla bituminosa se producen debido a las transferencias de calor entre el firme y el exterior. De la superficie del firme hacia abajo, el meca-

nismo de transferencia de energía predominante es el de conducción.

En la superficie del firme hay múltiples fuentes de transferencia de calor: la radiación, absorbida y reflejada (albedo) del Sol, la radiación emitida por la atmósfera, la radiación emitida por el firme a la atmosfera y la energía intercambiada entre el aire y la superficie mediante convección. Las transferencias de calor entre la superficie y el resto de las capas inferiores se llevan a cabo por conducción. En algunos de los modelos estudiados, no tienen en cuenta el efecto que provoca la precipitación o el efecto de la humedad en los ciclos de hielo-deshielo sobre la transferencia de calor en el firme.

Para poder establecer el balance energético que tiene lugar en la superficie del firme, se lleva a cabo el estudio de las principales fuentes de energía térmica que afectan a la superficie del firme en un momento dado. Estas aportaciones o fuentes de energía se pueden aproximar a partir de datos climatológicos y propiedades intrínsecas del firme. Estas expresiones se analizan a continuación.

## 2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR PROVOCADA POR LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA

La radiación solar directa que incide sobre la superficie del firme es en parte absorbida y en parte reflejada. La proporción de radiación incidente reflejada por una superficie es lo que se denomina albedo, que en el caso de las mezclas bituminosas varía entre 0,15 y 0,35 (Han *et al*., 2011). Por lo tanto, la radiación solar incidente que es absorbida por la superficie del firme se puede calcular a partir de la fórmula:

$$q_S = (1-\tilde{\alpha}) \cdot R_{solar} \quad (1)$$

$\alpha$ : Albedo (fracción de radiación solar reflejada por la superficie del firme).
$R_{solar}$: Radiación solar incidente sobre la superficie del firme.

## 2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR DEBIDO A LA RADIACIÓN DISPERSADA POR LA ATMÓSFERA

La atmósfera absorbe radiación y la emite como radiación de onda larga hacia la tierra. La radiación atmosférica absorbida por la superficie del firme se puede calcular a través de una fórmula empírica desarrollada por Geiger, y publicada en Dempsey *et al*., (1970):

$$q_a = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{aire}^4 \quad (2)$$

$\varepsilon_\alpha$ : Coeficiente de absorción de la superficie del firme para radiación de onda larga y la cantidad de nubes.
$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman.
$T_{aire}$: Temperatura del aire en °K.

## 2.3. TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LA RADIACIÓN EMITIDA POR EL FIRME

La superficie terrestre emite radiación de onda larga como un cuerpo negro por lo que sigue la ley de Stefan-Boltzman y otros (Hermansson, 2000 y 2001):

$$q_r = \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (3)$$

$\varepsilon_e$ : Coeficiente de emisión de la superficie del firme.
$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman.
$T_s$ : Temperatura de la superficie del firme en ºK.

## 2.4. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

La energía intercambiada entre el firme y el aire se produce a través del mecanismo de convección. Esta transferencia de energía en forma de calor se puede calcular a través de la ley de enfriamiento de Newton:

$$q_c = h_c \cdot (T_s - T_{aire}) \quad (4)$$

$h_c$ : Coeficiente de convección.
$T_s$ : Temperatura de la superficie del firme.
$T_{aire}$: Temperatura del aire.

El coeficiente de convección depende de la geometría de la superficie, la velocidad del viento y de las propiedades físicas del aire. En algunos casos también depende de la diferencia de temperaturas.

Este coeficiente de convección tiene una expresión empírica desarrollada por Lytton *et al*. (1989), donde se calcula su valor a través de la temperatura de superficie, la temperatura del aire y la velocidad del viento. La expresión es:

$$h_c = 698{,}24 \cdot a \cdot \cdot \left( 0{,}00144 \cdot \left( \frac{|T_s + T_{aire}|}{2} \right)^{0{,}3} \cdot U^d + 0{,}00097 \cdot (|T_s - T_{aire}|)^{0{,}3} \right) \quad (5)$$

$T_s$ : Temperatura de la superficie del firme.
$T_{aire}$: Temperatura del aire.
$U$ : Velocidad del viento (m/s).
$a, d$: Parámetros de dimensionamiento empírico.

Hermansson (2001) realizó un estudio de sensibilidad para encontrar los parámetros y que mejor se ajustaban a los datos empíricos. En este estudio varía los valores de y para diferentes grupos de datos y observa los errores que se cometen. Estos parámetros no presentan una sensibilidad elevada. En estudios como el de Minhoto *et al*. (2005) emplean valores para a y d de 1 y 0,7 respectivamente, mientras que en el caso del estudio de Han *et al*. (2011) emplea valores de 1,4 y 0,5 respectivamente.

## 2.5. TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE LA SUPERFICIE Y LA CAPA INFERIOR

La superficie del firme intercambia calor con el resto de capas inferiores principalmente mediante el mecanismo de conducción. La ley de Fourier relaciona el flujo de calor con el gradiente térmico en un material, por lo que el flujo de calor del firme en la superficie se expresa de la forma:

$$q_f = -k \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_s \quad (6)$$

$\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_s$ : Gradiente de temperatura en la superficie del firme.

$k$ : Conductividad térmica de la mezcla bituminosa.

La temperatura de un elemento diferencial de la superficie del firme cambia debido a las variaciones que se producen en las aportaciones de energía térmica que se han visto anteriormente, ecuaciones (1) a (6). La variación de la temperatura del firme a lo largo del tiempo se expresa mediante la ecuación del calor:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (7)$$

$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ : Coeficiente de difusión térmica.

$k$ : Conductividad térmica de la mezcla bituminosa.
$\rho$ : Densidad del material.
$C_p$ : Calor específico.
$T$ : Temperatura.
$t$ : Tiempo.

Esta ecuación (7) presenta como condición de contorno para la superficie del firme, considerando un elemento diferencial de la misma, la ecuación de balance energético siguiente:

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{\Delta x}{2}\right) \cdot \left(\frac{\partial T_s}{\partial t}\right) = q_s + q_a - q_r - q_c - q_f$$

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{\Delta x}{2}\right) \cdot \left(\frac{\partial T_s}{\partial t}\right) = (1-\tilde{\alpha}) \cdot R_{solar} + \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{aire}^4 - \quad (8)$$

$$- \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot T_s^4 - h_c \cdot (T_s - T_{aire}) + k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\Big|_s$$

$T_s$ : Temperatura de la superficie del firme.

$\left(\frac{\Delta x}{2}\right)$: Espesor del firme diferencial para el balance energético.

Como condición de contorno en el interior del firme, se establece que a partir de una cierta profundidad la temperatura es constante. Diferentes profundidades y temperaturas se han considerado; por ejemplo Hermansson (2000) usa la temperatura media anual a 5 m por debajo de la superficie del firme, mientras que en el caso de Han *et al*. (2011) emplean otra aproximación basada en los datos de la base de datos del programa "*Long-Term Pavement Performance*" (LTPP) desarrollado dentro del SHRP. Como alternativa consideran que a partir de los 3 m la temperatura es independiente de la profundidad. Esto les permite no tener que fijar un valor de temperatura constante a partir de una cierta profundidad, de forma que esta condición de contorno se vuelve independiente de la localidad donde se desarrolle el modelo (9):

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{3m} = independiente \ \ de \ \ x \quad (9)$$

La ecuación (7) se resuelve a partir de distintas técnicas de cálculo numérico. La mayor parte de los modelos de temperatura del firme se han resuelto mediante la técnica de diferencias finitas. En los últimos años se ha incorporado la técnica de elementos finitos para la resolución de esta ecuación (Minhoto *et al*., 2005).

## 3. ALGORITMOS PARA EL CÁLCULO DE LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS

A partir de la ecuación de balance energético en la superficie del firme (8), y con datos de diferentes zonas climáticas, varios autores, entre ellos Solaimanian *et al*. (1993) y Viljoen (2001), desarrollaron una serie de algoritmos para poder predecir las temperaturas máximas y mínimas de la superficie del firme, y a diferentes profundidades, a partir de la temperatura del aire y de la latitud (también del día del año en el caso de Viljoen (2001)). El objetivo es la obtención de un método sencillo y rápido para poder predecir de forma precisa las temperaturas extremas a las que se verá sometida una mezcla bituminosa, de forma que se pueda aplicar en el diseño de mezclas asfálticas (concretamente en la selección de los betunes en función de estas temperaturas extremas de trabajo).

### 3.1. ALGORITMO SUPERPAVE

Los algoritmos desarrollados por Solaimanian *et al*. (1993), con una serie de mejoras gracias a los estudios de Huber *et al*. (1994), que se emplean en el Superpave, se obtienen a partir de un análisis de regresión y están basados en la ecuación de balance energético. A partir de la temperatura del aire y de la latitud se pueden predecir esas temperaturas máximas y mínimas de trabajo de la mezcla. Los algoritmos del Superpave para el cálculo de las temperaturas máximas se desarrollaron para ser aplicadas en los meses de verano, ya que al ser las temperaturas del aire mayores y mayor la radiación solar absorbida por el firme, se producirán las temperaturas más altas en el mismo. En el caso de los algoritmos para las temperaturas mínimas, estos se aplican en el invierno, en la época donde se suponen que las temperaturas serán mínimas.

El objetivo de estos algoritmos es encontrar las temperaturas máximas y mínimas anuales que en una localidad determinada deberán soportar las mezclas asfálticas que se coloquen en los firmes, para poder diseñarlas conforme a esos parámetros climáticos.

Para predecir la temperatura máxima y la mínima en la superficie del firme se desarrollaron las siguientes expresiones:

$$T_{s(\max)} = T_{a(\max)} - 0,00618 \cdot \varphi^2 + 0,2289 \cdot \varphi + 24,4 \quad (10)$$

$$T_{s(\min)} = 0,859 \cdot T_{a(\min)} + 1,7 \quad (11)$$

$T_{s(\max)}$: Temperatura máxima en la superficie del firme (°C).
$T_{a(\max)}$: Temperatura máxima del aire (°C).
$T_{s(\min)}$: Temperatura mínima en la superficie del firme (°C).
$T_{a(\min)}$: Temperatura mínima del aire (°C).
$\sigma$ : Latitud (en grados).

En el caso del Superpave se establece que la profundidad para el cálculo de las temperaturas máxima y mínima anuales que debe considerarse para el diseño de las mezclas bituminosas es de 20 mm. Para poder estimarlas a distintas profundidades se desarrollaron las siguientes expresiones que relacionan la temperatura máxima y mínima a una profundidad determinada con la temperatura máxima o mínima en la superficie del firme y esa profundidad:

$$T_{d(\max)} = \left(T_{s(\max)} + 17,8\right) \cdot \left(1 - 2,48 \cdot 10^{-3} \cdot d + 1,085 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 - 2,441 \cdot 10^{-8} \cdot d^3\right) - 17,8 \quad (12)$$

$$T_{d(\min)} = T_{s(\min)} + 5,1 \cdot 10^{-2} \cdot d - 6,3 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 \quad (13)$$

$T_{s(\max)}$: Temperatura máxima en la superficie (°C).
$T_{d(\max)}$: Temperatura máxima a la profundidad d (°C).
$T_{s(\min)}$: Temperatura mínima en la superficie (°C).
$T_{d(\min)}$: Temperatura mínima a la profundidad d (°C).
$d$ : Profundidad de cálculo de la temperatura del firme (mm).

### 3.2. ALGORITMO VILJOEN

A partir de los datos recogidos por Everitt (éste trató de calibrar los algoritmos del Superpave para usar en Sudáfrica), Williamson y otros estudios locales, Viljoen (2001) desarrolló unas ecuaciones de predicción de la temperatura del firme aplicables en Sudáfrica. Denneman (2007) presenta la validación de estas ecuaciones con datos distintos a los empleados en su desarrollo.

Finalmente la expresión desarrollada por Viljoen para la temperatura máxima diaria en la superficie es la siguiente:

$$T_{s(\max)} = T_{a(\max)} - 24,5 \cdot \left(\cos(Z_n)\right)^2 \cdot C \quad (14)$$

$T_{s(\max)}$: Temperatura máxima diaria en la superficie del firme.
$T_{a(\max)}$: Temperatura máxima diaria del aire.
$Z_n$ : Zenit al mediodía.
$C$ : Índice de nubes:
C = 1,1 si $T_{a(\max)}$>30°C.
C = 1,0 si la media de la T mensual del aire <$T_{a(\max)}$<30°C.
C = 0,25 si <$T_{a(\max)}$ la media mensual de la T del aire.

El zenit es función de la declinación y la latitud:

$$\cos(Z_n) = seno(Latitud)\cdot seno(Declinación) + \\ + \cos(Latitud)\cdot \cos(Declinación) \quad (15)$$

Y la declinación es función del día del año para el cual se predice la temperatura máxima de la superficie del firme:

$$Declinación = -23,45^{o}\cdot\cos\left[\frac{360^{o}}{365}\cdot(N+10)\right] \quad (16)$$

N es el día del año (empezando por 1 para el 1 de enero).

Para la temperatura mínima diaria en la superficie del firme, la expresión desarrollada por Viljoen se expresa:

$$T_{s(\min)} = 0,89\cdot T_{a(\min)} + 5,2 \quad (17)$$

$T_{s(\min)}$: Temperatura mínima diaria en la superficie del firme.
$T_{a(\min)}$: Temperatura mínima diaria del aire.

La principal diferencia entre las ecuaciones del Superpave y las de Viljoen es que este último introduce el zenit en vez de sólo la latitud, de esta manera considera las variaciones diarias de la radiación solar dependiendo de la estación del año. Con la introducción de este nuevo parámetro, el zenit, se pretende poder predecir las temperaturas máximas y mínimas en cualquier época del año, con lo que no se restringe, como en el caso del Superpave, a los meses de verano y los meses de invierno. En las ecuaciones de Viljoen se incluye también un coeficiente para introducir los días nublados, mientras que en el caso del Superpave no considera la nubosidad.

Viljoen desarrolló expresiones para hallar las temperaturas extremas a diferentes profundidades dentro del firme, siguiendo el modelo del Superpave. Sus expresiones analíticas son:

$$T_{d(\max)} = T_{s(\max)}\cdot \\ \cdot\left(1 - 4,237\cdot 10^{-3}\cdot d + 2,95\cdot 10^{-5}\cdot d^{2} - 8,53\cdot 10^{-8}\cdot d^{3}\right) \quad (18)$$

$$T_{d(\min)} = T_{s(\min)} + 3,7\cdot 10^{-2}\cdot d - 6,29\cdot 10^{-5}\cdot d^{2} \quad (19)$$

$T_{s(\max)}$: Temperatura máxima diaria en la superficie (°C).
$T_{d(\max)}$: Temperatura máxima diaria a la profundidad d (°C).
$T_{s(\min)}$: Temperatura mínima diaria en la superficie (°C).
$T_{d(\min)}$: Temperatura mínima diaria a la profundidad d (°C).
$d$ : Profundidad de cálculo de la temperatura del firme (mm).

## 4. VALIDACIÓN DE LOS ALGORITMOS ESTUDIADOS PARA EL CÁLCULO DE LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS

En este trabajo se ha realizado un primer estudio de validación de los algoritmos desarrollados por Solaimanian *et al.* (1993) y Viljoen (2001), los denominados algoritmo Superpave y algoritmo Viljoen respectivamente.

Los algoritmos desarrollados por Solaimanian *et al.* (1993), con una serie de mejoras gracias a los estudios de Huber *et al.* (1994), se emplean en el Superpave, que se aplica en Estados Unidos, Canadá y muchos otros países del mundo. Por otro lado, los algoritmos obtenidos por Viljoen (2001) se desarrollaron como mejora de los algoritmos del Superpave y para aplicarlos en Sudáfrica, de forma que actualmente se emplean en ese país como parte de su nueva guía de diseño de firmes.

El objetivo ha sido comprobar cómo se ajustan esos algoritmos desarrollados a partir de datos de otras zonas climáticas del mundo a los datos obtenidos en la zona climática de la Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX.

### 4.1. MATERIAL Y MÉTODO

La Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX cuenta con una base de datos, con registros desde el año 1997 y completamente actualizada, de temperatura del firme a distintas profundidades, temperatura ambiente y radiación global registrados cada 5 minutos.

Esta base de datos es alimentada con los valores de las temperaturas del firme obtenidos a través de los sensores de temperatura embebidos en los firmes colocados en la instalación. Se trata de sensores de tipo resistivos, basados en las variaciones de resistencia que experimenta un conductor al variar la temperatura. Estos sensores presentan una alta linealidad y un amplio margen de temperaturas.

Los datos de radiación almacenados se registran con un piranómetro de la marca Kipp&Zonen, modelo CMP11, para medir la radiación solar global (radiación solar directa más la radiación solar difusa) recibida en una superficie plana. La radiación solar directa es la que incide sobre una superficie desde la dirección del Sol, mientras que la radiación solar difusa es la que llega a la superficie desde todas las direcciones después de ser modificada por las partículas que se encuentran en la atmósfera. Este piranómetro se encuentra situado en la cubierta del Centro de Control de la Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX.

Los datos de temperatura ambiente provienen de una estación meteorológica perteneciente a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) que se encuentra en las instalaciones del CEDEX, con medida de temperatura ambiente, humedad, dirección y velocidad del viento y precipitación. Esta estación es gestionada y mantenida por el personal del CEDEX responsable de la Pista de Ensayo de Firmes.

### 4.2. PROCEDIMIENTO PARA LA VALIDACION DE LAS ECUACIONES DE LOS ALGORITMOS

Se seleccionó un periodo de tiempo de la época estival, para ajustarse a los requisitos del algoritmo Superpave, que es el más restrictivo con el tipo de datos que se necesitan. Los días seleccionados fueron 16, 17 y 18 de agosto de 2007.

Se utilizaron los datos de los sensores situados en la superfice del firme y a las profundidades de 3 cm, 9 cm y 15 cm.

Para llevar a cabo la validación de cada uno de los métodos se realizaron los siguientes pasos:

- Se aplicaron las ecuaciones de cada uno de estos algoritmos para el cálculo de las temperaturas máximas y mínimas diarias del firme.
- Se calcularon las temperaturas máximas y mínimas para la superficie del firme y a las tres profundidades seleccionadas.

Se compararon los resultados obtenidos con los valores de temperatura medidos por los sensores.

### 4.3. RESULTADOS

#### *4.3.1. Temperaturas máximas y mínimas en la superficie del firme*

A continuación se presenta la validación de los resultados obtenidos con los dos algoritmos para la temperatura máxima y mínima calculada en la superficie del firme.

*Algoritmo Superpave*

A partir de la temperatura del aire y de la localización, a través de la latitud de la Pista de Ensayo de Firmes (40,562°), se obtiene la estimación de la temperatura máxima (10) y mínima (11) en la superficie del firme que se presenta en la Figura 1.

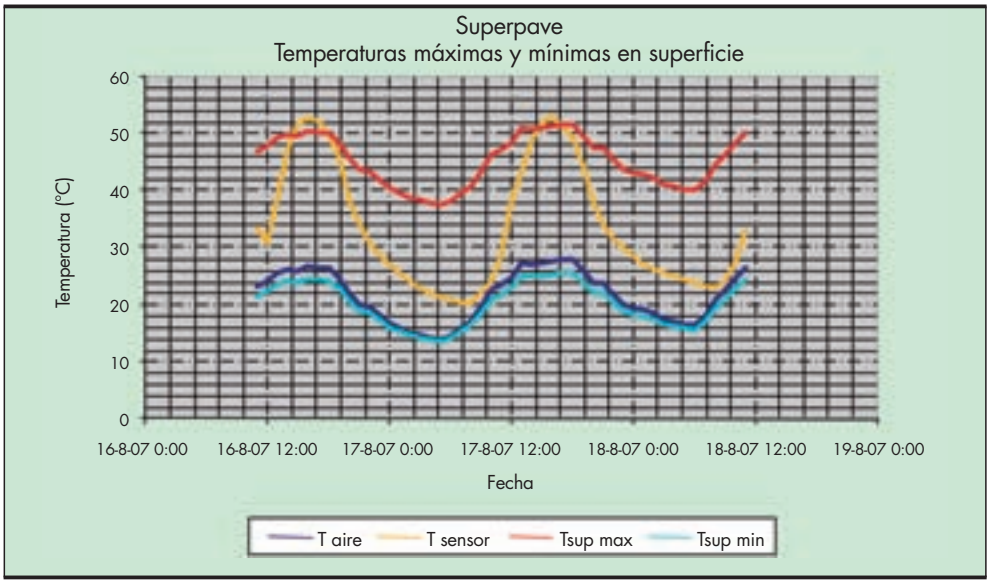



**FIGURA 1.** Temperaturas máximas y mínimas en superficie con Superpave.

$T_{sup\ max}$ : Temperatura máxima calculada en la superficie del firme.
$T_{sup\ min}$ : Temperatura mínima calculada en la superficie del firme.
$T_{aire}$ : Temperatura del aire medida en la estación meteorológica de la Pista.
$T_{sensor}$ : Temperatura en la superficie medida con el sensor de la Pista.

*Algoritmo Viljoen*

A partir de la temperatura ambiente, del día del año y de la latitud se estima la temperatura máxima (14) y mínima (17) diaria en la superficie del firme. El resultado se presenta en la Figura 2.

$T_{sup\ max}$ : Temperatura máxima calculada en la superficie del firme.
$T_{sup\ min}$ : Temperatura mínima calculada en la superficie del firme.
$T_{aire}$ : Temperatura del aire medida en la estación meteorológica de la Pista.
$T_{sensor}$ : Temperatura en la superficie medida con el sensor de la Pista.

### 4.3.2. *Temperaturas máximas y mínimas a distintas profundidades*

*Algoritmo Superpave*

A partir de las expresiones (12) y (13) se calculan las temperaturas máximas y mínimas a cada hora, en el periodo estival seleccionado. Para el cálculo de las mismas se emplean las temperaturas máximas y mínimas calculadas en la superficie del firme a través de las expresiones (10) y (11). Los resultados obtenidos para las distintas profundidades se presentan en las Figuras 3, 4 y 5.

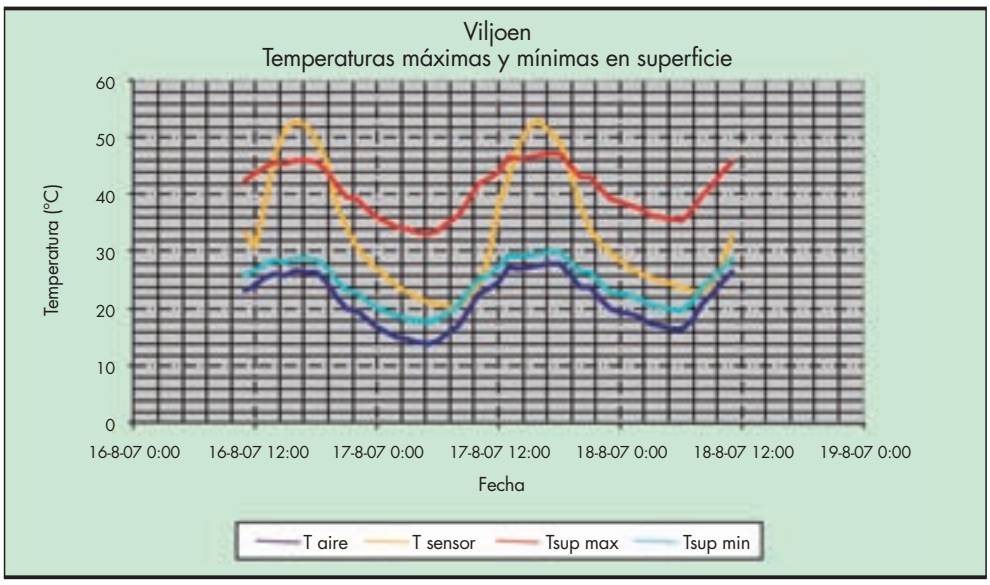



**FIGURA 2.** Temperaturas máximas y mínimas en superficie con Viljoen.

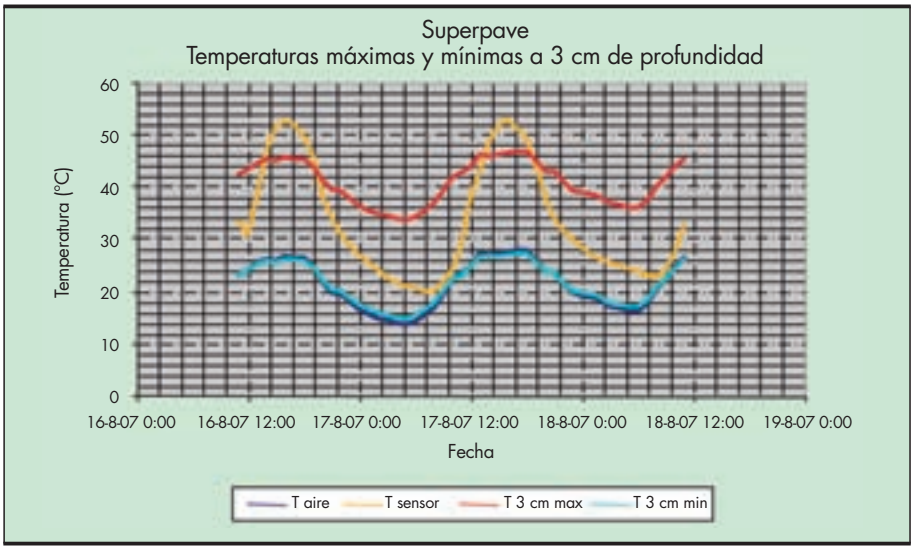



**FIGURA 3.** Temperaturas extremas a 3 cm con Superpave.

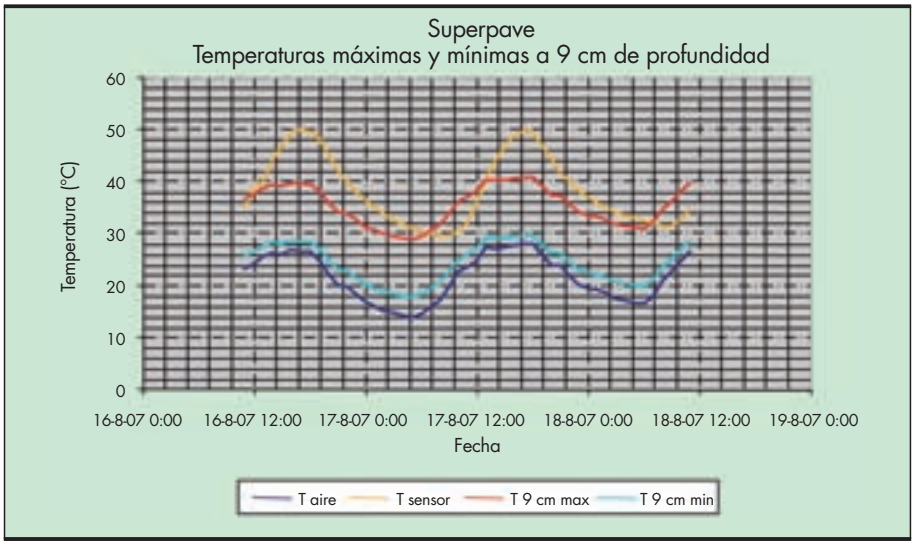



**FIGURA 4.** Temperaturas extremas a 9 cm con Superpave.

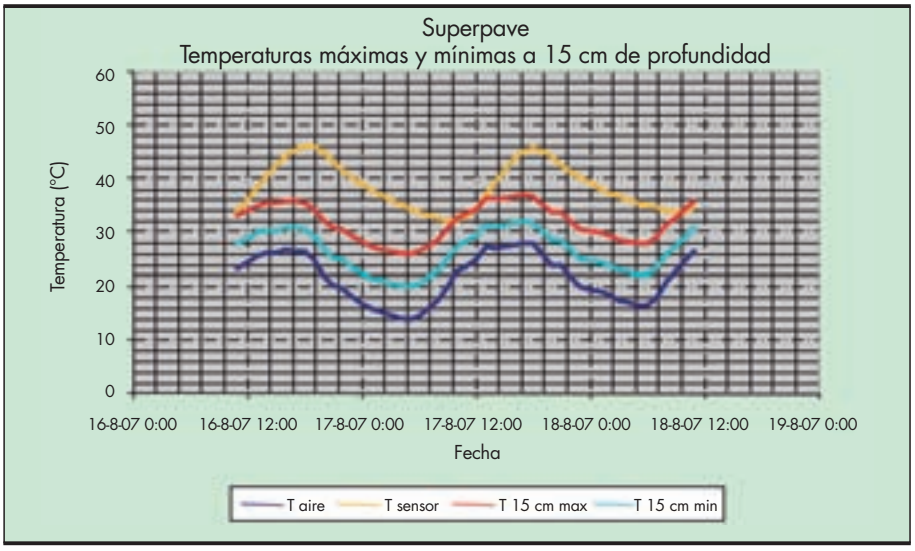



**FIGURA 5.** Temperaturas extremas a 15 cm con Superpave.

*Algoritmo Viljoen*

Para el cálculo de las mismas se emplean las temperaturas máximas y mínimas calculadas en la superficie del firme a través de las expresiones (14) y (17). Las temperaturas extremas a distintas profundidades se calculan a partir de (18) y (19). Los resultados se presentan en las Figuras 6, 7 y 8.

En las siguientes tablas se presentan los errores cometidos por los dos métodos, en el cálculo de la temperatura máxima (Tabla 1) y en el cálculo de la mínima (Tabla 2).

## 4.4. DISCUSIÓN

Del análisis de las Tablas 1 y 2 se observa que para las temperaturas máximas y mínimas en superficie de cada día los datos obtenidos con Superpave infraestiman los valores reales de temperatura. En el caso del día 17 de agosto de 2007 los valores de la temperatura máxima calculada y la real en superficie difieren en 1,5°C. El 16 de agosto de 2007 la diferencia entre la temperatura máxima real y la temperatura calculada difiere en 2,4°C. Para las temperaturas mínimas calculadas se comparan los días 17 y 18. Para estos días la diferencia entre la temperatura mínima medida con el sensor y la temperatura mínima calculada es de 6,8°C y 7,1°C, respectivamente.

Con el método de Viljoen se infraestiman las temperaturas de la superficie del firme, al igual que con el de Superpave. Para el día 17 de agosto de 2007 la diferencia entre el valor máximo real y el valor máximo calculado es de 5,7°C. El día 16 de agosto la diferencia es de 6,5°C. El en caso de las temperaturas mínimas, el día 17 se produce una diferencia entre el valor real y el calculado de 2,8°C y el día 18 la diferencia es de 3,1°C.

Los valores de temperaturas máximas y mínimas diarias a distintas profundidades vuelven a estar infraestimados por ambos métodos.

En cuanto a los errores, tanto para el método Superpave como el Viljoen, los cometidos en el cálculo de las temperaturas máximas se hacen mayores al aumentar la profundidad. Sin embargo para las temperaturas mínimas, ambos métodos cometen menor error al calcularlas a una profundidad de 3 cm que la estimación que hacen en la superficie.

Superpave aproxima con menor error que Viljoen los valores de las temperaturas máximas mientras que Viljoen aproxima con menor error los valores de las temperaturas mínimas.

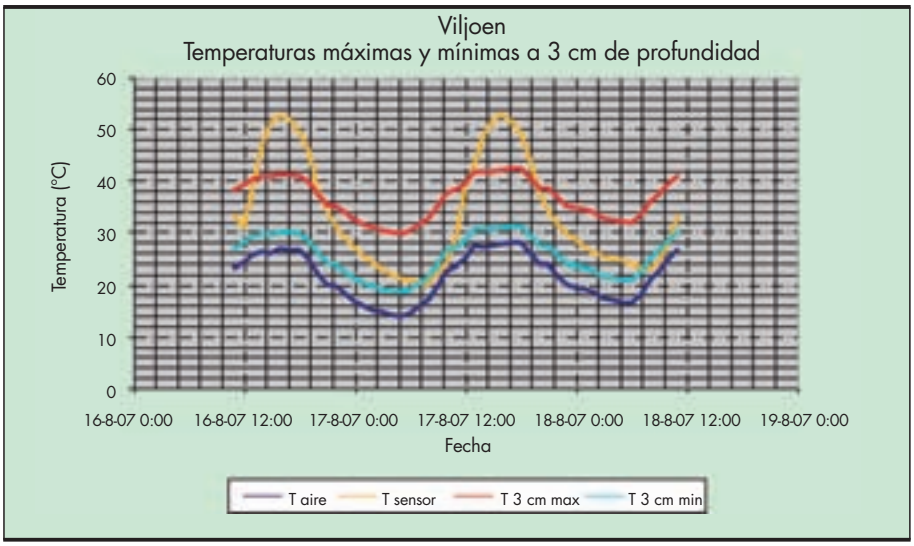



**FIGURA 6.** Temperaturas extremas a 3 cm con Viljoen.

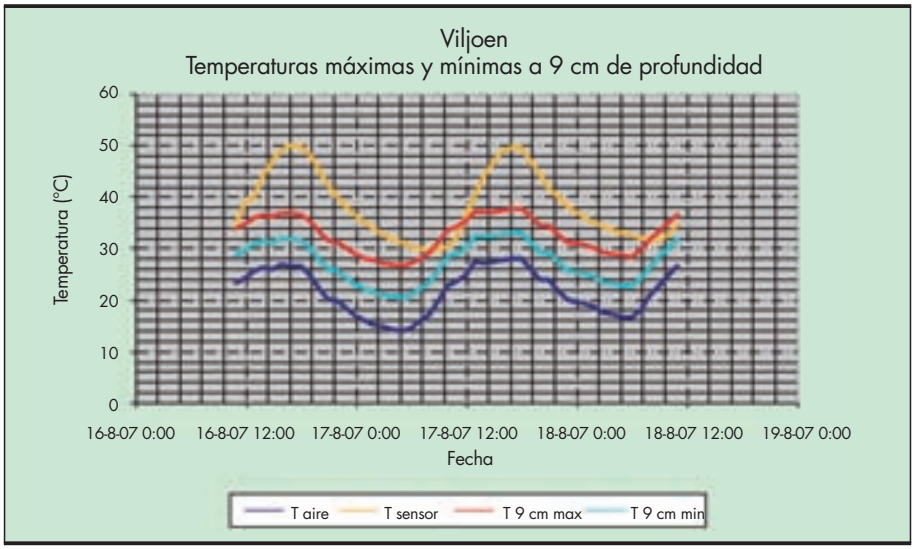



**FIGURA 7.** Temperaturas extremas a 9 cm con Viljoen.

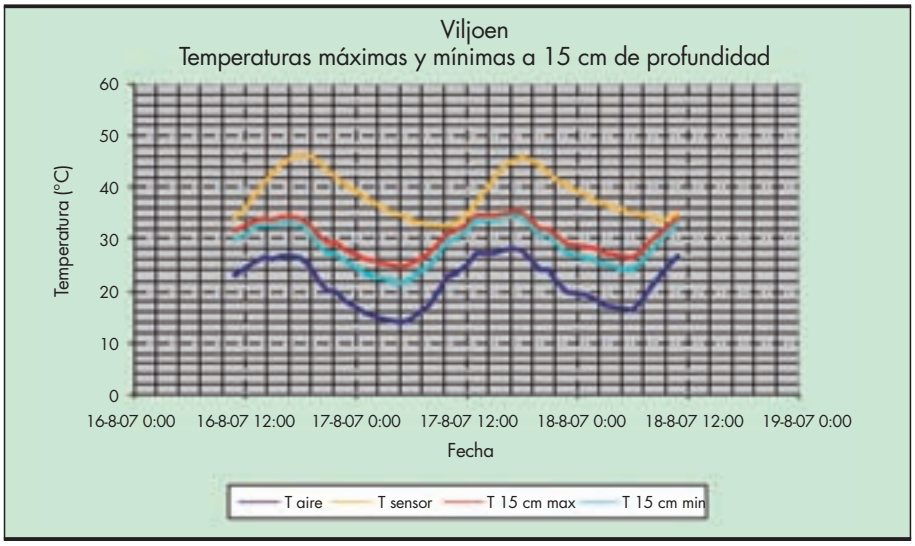



**FIGURA 8.** Temperaturas extremas a 15 cm con Viljoen.

| Temperaturas Máximas (°C) | | | |
|---|---|---|---|
| Fecha | Profundidad sensor | $T_{sensor} - T_{Superpave}$ | $T_{sensor} - T_{Viljoen}$ |
| 16/08/2007 | Superficie | 2,42 | 6,50 |
| 17/08/2007 | Superficie | 1,50 | 5,69 |
| 16/08/2007 | 3 cm | 6,86 | 11,24 |
| 17/08/2007 | 3 cm | 6,03 | 10,56 |
| 16/08/2007 | 9 cm | 10,30 | 13,40 |
| 17/08/2007 | 9 cm | 8,84 | 12,09 |
| 16/08/2007 | 15 cm | 10,32 | 12,08 |
| 17/08/2007 | 15 cm | 8,73 | 10,63 |

**TABLA 1.** Errores en la predicción de la temperatura máxima.

| Temperaturas Mínimas (°C) | | | |
|---|---|---|---|
| Fecha | Profundidad sensor | $T_{sensor} - T_{Superpave}$ | $T_{sensor} - T_{Viljoen}$ |
| 17/08/2007 | Superficie | 6,71 | 2,78 |
| 18/08/2007 | Superficie | 7,10 | 3,09 |
| 17/08/2007 | 3 cm | 5,24 | 1,73 |
| 18/08/2007 | 3 cm | 5,62 | 2,03 |
| 17/08/2007 | 9 cm | 11,85 | 9,18 |
| 18/08/2007 | 9 cm | 11,76 | 9,00 |
| 17/08/2007 | 15 cm | 12,42 | 10,59 |
| 18/08/2007 | 15 cm | 11,65 | 9,74 |

**TABLA 2.** Errores en la predicción de la temperatura mínima.

## 5. DESARROLLO DE UN MODELO PROBABILÍSTICO DE PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL FIRME

Una vez validados los métodos anteriores y al observar los errores cometidos en la estimación de las temperaturas para nuestra localización geográfica, se procedió a estudiar la relación de los datos disponibles y obtenidos en la Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX, con diferentes variables o parámetros climáticos. Como en el estudio de Velasquez *et al*. (2008), se observó que la temperatura ambiente junto con la radiación solar, son los parámetros climáticos que más afectan al valor de la temperatura de la superficie del firme.

Se planteó el desarrollo de un *modelo de regresión multivariante*, denominado Modelo CEDEX. Este modelo permite establecer una relación matemática entre un conjunto de variables (en este caso temperatura ambiente y radiación) y una variable dependiente (en este caso la temperatura del firme).

### 5.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos escogidos para el desarrollo del modelo de regresión corresponden al intervalo temporal comprendido entre el día 27 de noviembre de 2011 y el 31 de enero de 2012. Se trata de meses de la estación de invierno.

Para analizar la fiabilidad del Modelo CEDEX, se validó éste con datos externos a los empleados en su desarrollo. Los datos corresponden al periodo comprendido entre el 1 de octubre del 2007 y el 11 de noviembre de 2008. La frecuencia empleada en la validación es la misma que la empleada en el desarrollo del modelo. Se introducen datos de medidas cada 5 minutos. En total se han empleado 12.649 registros con los datos de temperatura ambiente, temperatura en la superficie del firme y radiación global.

En la comparación del Modelo CEDEX con los métodos validados en la primera parte del artículo se emplearon los datos correspondientes al intervalo temporal comprendido entre el día 27 de noviembre de 2011 y el 31 de enero de 2012.

| Variables | Coeficientes | Error típico | Estadístico t |
|---|---|---|---|
| Intersección: *C* | 2,19 | 0,02 | 111,80 |
| Temperatura ambiente: *A* | 0,713 | 0,004 | 198,831 |
| Radiación: *B* | –0,0059 | 0,0001 | –43,2649 |

**TABLA 3.** Coeficientes del modelo obtenidos por la técnica de mínimos cuadrados.

## 5.2. PROCEDIMIENTO

El modelo de regresión planteado es un modelo lineal en el que las variables independientes consideradas son la temperatura del aire y la radiación global incidente sobre la superficie del firme. El objetivo del modelo es predecir las temperaturas en la superficie del firme a través de variables climáticas.

Como se ha expuesto en el presente artículo, las variables que afectan a la temperatura del firme son muy numerosas, por lo que se decidió trabajar en la obtención de un modelo predictivo lo más sencillo posible y en donde las variables de entrada al modelo sean fáciles de obtener.

En el trabajo presentado por Diefenderfer *et al*. (2003) presentan una serie de modelos de regresión lineal para predecir las temperaturas máximas y mínimas, a partir de la temperatura del aire, la radiación diaria y la profundidad. También presentan modelos para predecir estas temperaturas sustituyendo la radiación diaria por el día del año y la latitud.

El planteamiento de este estudio fue similar al de Diefenderfer *et al*. (2003), salvo que en este caso se planteó un modelo para predecir las temperaturas de la superficie del firme a través de la temperatura del aire y de la radiación para cualquier momento del día. En el caso de Diefenderfer *et al*. (2003) los modelos planteados se emplean sólo para calcular las temperaturas máximas y mínimas diarias.

Se planteó un modelo de regresión lineal multivariante del tipo:

$$T_s = A \cdot T_{amb} + B \cdot R_g + C \qquad (20)$$

En el Modelo CEDEX planteado (20) se tiene:

$T_s$ : Temperatura calculada en la superficie del firme.
$T_{amb}$: Temperatura ambiente.
$R_g$ : Radiación solar incidente sobre la superficie del firme (directa más difusa).

*A*, *B*, y *C* son los coeficientes de las variables independientes del modelo y de la intersección.

Los coeficientes del modelo (20) se calculan a partir de la técnica de mínimos cuadrados mediante los datos reales registrados de temperatura de superficie del firme, temperatura ambiente y radiación.

## 5.3. RESULTADOS DEL MODELO CEDEX OBTENIDO

Los datos obtenidos para los coeficientes se presentan a continuación (Tabla 3).

Finalmente, la expresión analítica del Modelo CEDEX queda de la forma:

$$T_s = 7{,}13 \cdot 10^{-1} \cdot T_{amb} - 5{,}95 \cdot 10^{-3} \cdot R_g + 2{,}19 \qquad (21)$$

En la Tabla 4 se presentan las estadísticas de la regresión y el análisis de la varianza del conjunto de datos empleado para desarrollar el Modelo CEDEX (21).

| Estadísticas de la regresión | |
|---|---|
| Coeficiente de correlación múltiple | 0,89 |
| Coeficiente de determinación R^2 | 0,80 |
| R^2 ajustado | 0,80 |
| Error típico | 1,80 |
| Observaciones | 18.426 |

| Análisis de varianza | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | *F* | Valor crítico de *F* |
| Regresión | 2 | 237983,19 | 118991,60 | 36781,93 | 0 |
| Residuos | 18423 | 59599,44 | 3,24 | | |
| Total | 18425 | 297582,63 | | | |

**TABLA 4.** Estadísticas de la regresión y análisis de varianza.

## 5.4. MODELO CEDEX CON DÍAS SOLEADOS

En la Figura 9 se presentan los datos de predicción del Modelo CEDEX (21) para tres días del mes de diciembre de 2011 en los que el cielo se encontraba completamente despejado.

La radiación medida en esos tres días se presenta en la Figura 10.

Como se observa por las curvas de la gráfica de la Figura 13, se trata de tres días en los que el cielo se encontraba despejado, ya que no se aprecian picos que indicarían el paso o localización de nubes en el cielo, provocando que la radiación global incidente sobre el firme disminuya.

## 5.5. MODELO CEDEX CON DÍAS DESPEJADOS, PARCIALMENTE NUBLADOS Y NUBLADOS

En la Figura 11 se representan los valores de predicción del Modelo CEDEX (21) y los datos reales medidos con la instrumentación para días despejados, parcialmente nublados y nublados.

En la Figura 12 se pueden ver las curvas de radiación medidas durante el periodo de tiempo representado anteriormente, observándose las diferencias entre los días despejados, nublados y parcialmente nublados.

## 5.6. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO CEDEX

A continuación se presentan dos ejemplos de los datos estimados por el Modelo CEDEX para dos periodos de tiempo distintos a los empleados en su desarrollo. En el primer caso, Figura 13, se representa la estimación del modelo para los datos obtenidos entre el 11 de diciembre de 2007 y el 14 de diciembre de 2007.

Por último se aplica el Modelo CEDEX a los datos comprendidos entre el 9 de noviembre de 2008 y el 11 de noviembre de 2008 (Figura 14).

## 5.7. COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS

Para llevar a cabo una comparación entre el modelo desarrollado y otros métodos de predicción de la temperatura del firme, se calculan las temperaturas máximas diarias con el Modelo CEDEX y con los métodos validados en la primera parte del artículo, Suerpave y Viljoen, y se comparan los valores obtenidos con los valores reales registrados.

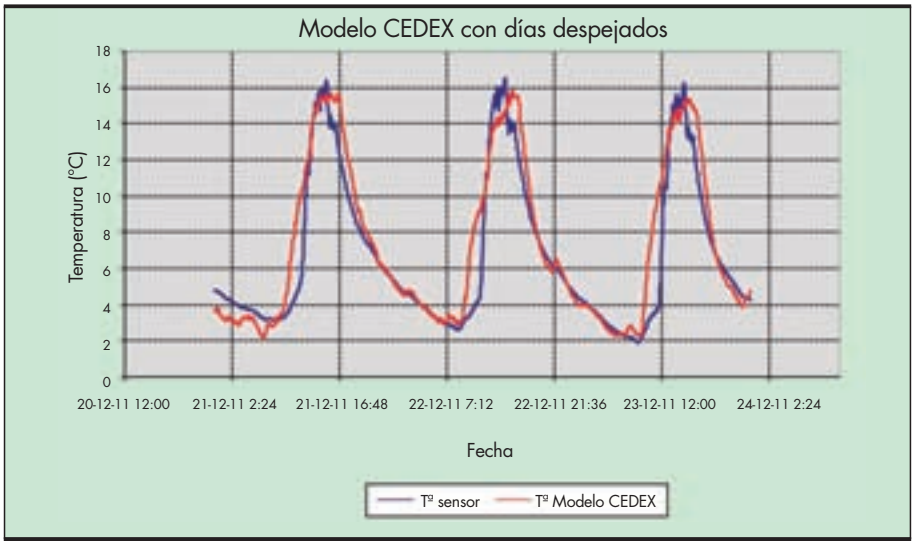



**FIGURA 9.** Modelo probabilístico desarrollado para días despejados.

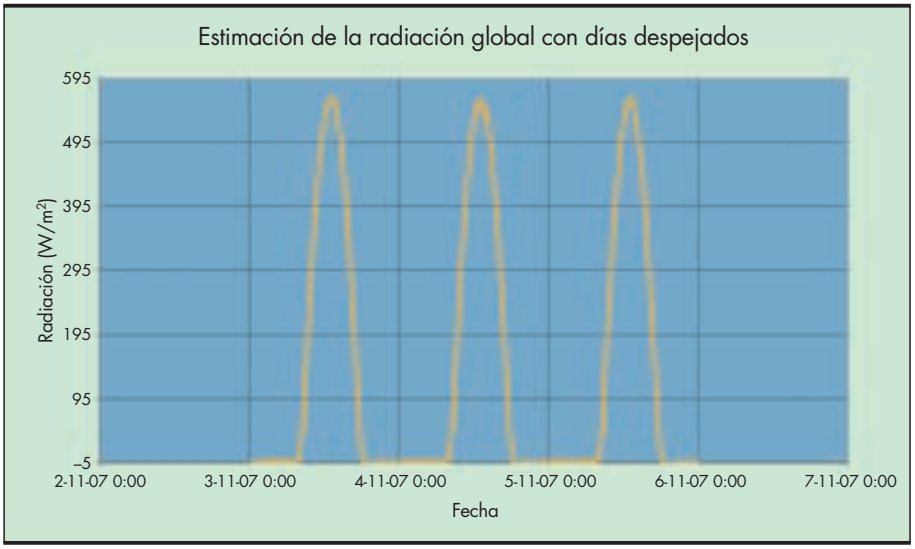



**FIGURA 10.** Radiación medida por el piranómetro en días despejados.

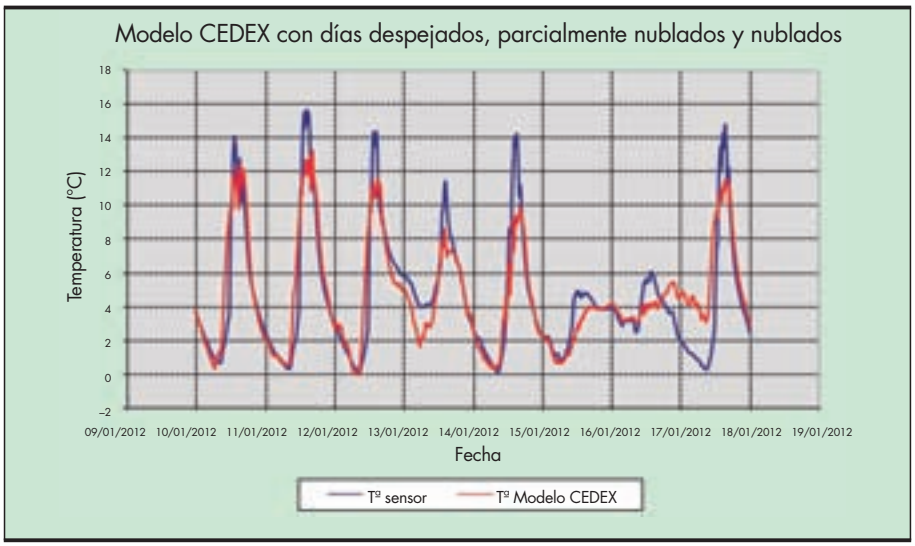



**FIGURA 11.** Modelo probabilístico desarrollado para diferentes condiciones del cielo.

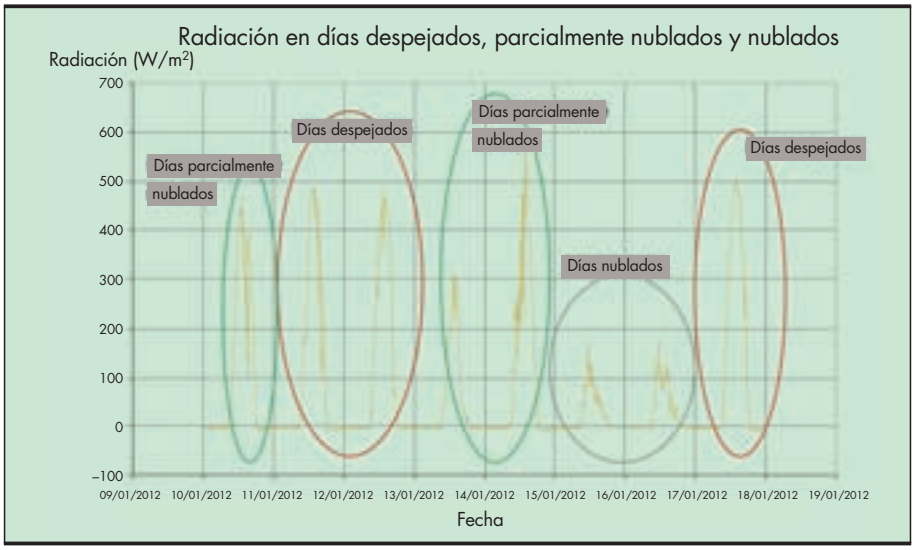



**FIGURA 12.** Radiación medida por el piranómetro para diferentes condiciones del cielo.

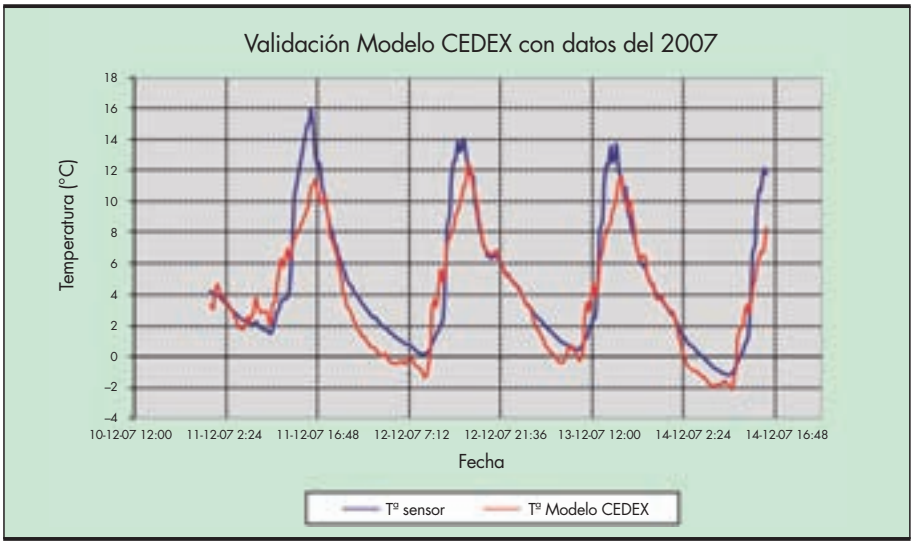



**FIGURA 13.** Validación del modelo con datos de diciembre de 2007.

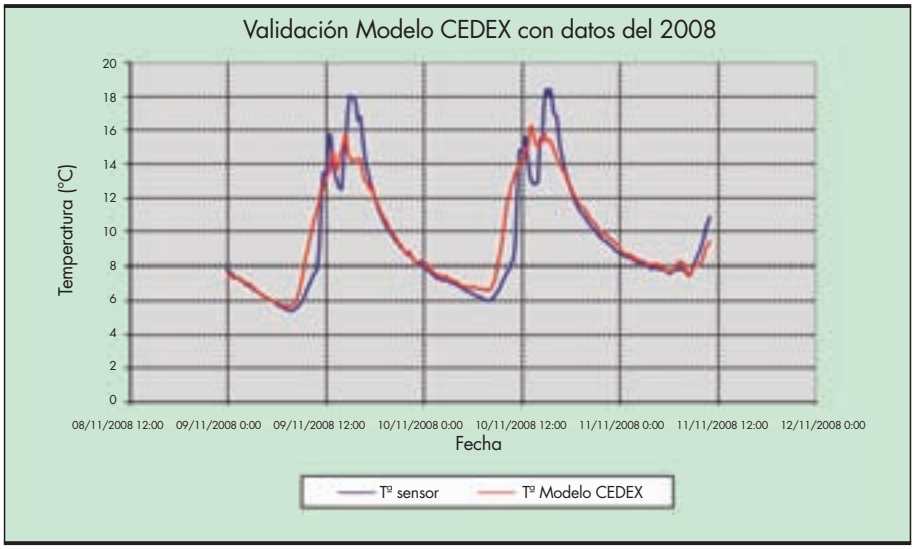



**FIGURA 14.** Validación del modelo con datos de noviembre de 2008.

En la Figura 15 se representan las temperaturas máximas diarias de la superficie del firme y las estimadas con el Modelo CEDEX, así como las temperaturas máximas diarias del ambiente.

En la Figura 16 se representan los valores predichos por los tres métodos, el Modelo CEDEX y los algoritmos Superpave y Viljoen, frente al valor real registrado. La línea negra marca la correlación perfecta entre valor predicho y valor real.

### 5.8. EXTRAPOLACIÓN DEL MODELO A OTRAS LOCALIZACIONES

El modelo probabilístico desarrollado en este estudio se ha realizado con los datos de la Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX, tanto las temperaturas del firme como los datos climáticos (temperatura ambiente y radiación).

Para poder extrapolar el modelo a otras localizaciones se debe tener en cuenta la medida de la radiación global. En caso de no disponer de instrumentación adecuada en el lugar en el que se quiere emplear el modelo se debe poder estimar el valor de esta radiación, que es la suma de la radiación directa y de la radiación difusa medidas a través de un piranómetro.

Para predecir el valor de esta radiación global empleada como entrada en el modelo, se hace uso de los distintos modelos empíricos desarrollados para estimar la radiación proveniente del Sol en cualquier momento del día y para cualquier día del año.

La radiación total proveniente del Sol que llega a una superficie situada fuera de la atmósfera terrestre se denomina radiación extraterrestre. Determina un valor máximo teórico de la energía solar disponible. Como patrón básico se toma la constante solar, $I_{sc}$, definida como el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera. El valor comúnmente aceptado para $I_{sc}$ ha variado en los últimos años, dependiendo de la técnica de medida que se haya empleado, en nuestro caso se ha usado el valor de: $I_{sc} = 1367$ W/m$^2$ (Lytton *et al.*, 1989). La irradiancia (potencia de radiación por unidad de superficie) incidente sobre una superficie cualquiera en un instante dado, viene establecida por:

$$I_0 = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos\theta_z \qquad (22)$$

Donde $\theta_z$ es el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie, el ángulo cenital, y $E_0$ es el factor de corrección de la distancia Tierra-Sol debido a la excentricidad de la ór-

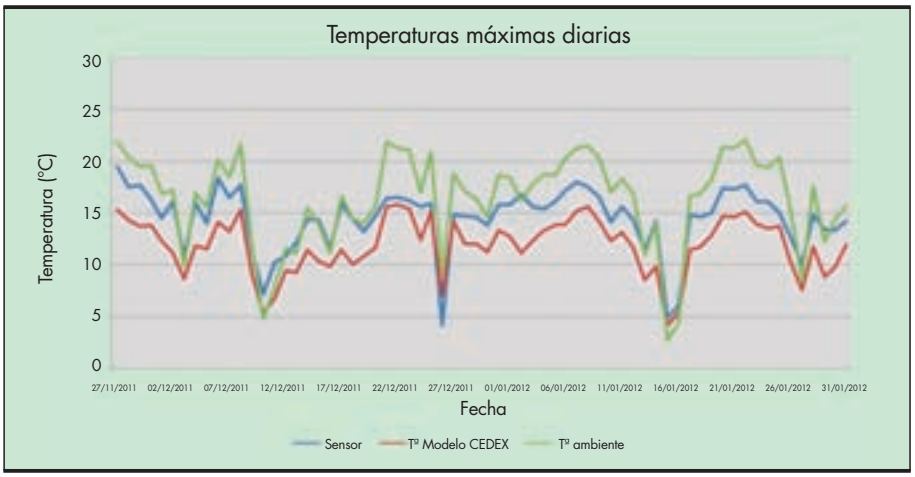



**FIGURA 15.** Temperaturas máximas diarias predichas por el modelo desarrollado.

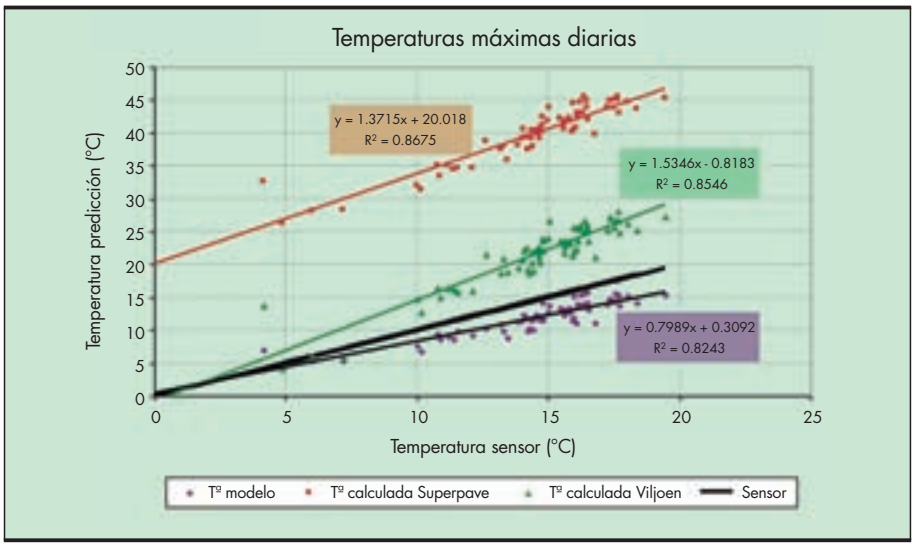



**FIGURA 16.** Comparación entre métodos para las temperaturas máximas diarias.

bita terrestre. Este factor se puede calcular a partir de la expresión (23):

$$E_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{365}\right) \quad (23)$$

Siendo n el día del año comenzando por 1 para el 1 de enero.

Para una superficie horizontal, el coseno del ángulo cenital se puede calcular a través de la latitud ($\phi$), la declinación ($\delta$) y el ángulo horario ($\omega$), que es el desplazamiento angular del Sol, al este o al oeste del meridiano local, debido a la rotación de la Tierra. Con todo ello la expresión del coseno del ángulo cenital queda de la forma:

$$\cos\theta_z = sen\phi \cdot sen\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (24)$$

El ángulo horario ($\omega$) indica el desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria solar, al este o al oeste del meridiano local, debido a la rotación de la Tierra, negativo por la mañana y positivo por la tarde. El mediodía solar es por definición $\omega$=0°. Cada hora equivale a 15°. Se puede calcular el ángulo horario correspondiente a una hora determinada del siguiente modo:

$$\omega = 15 \cdot TSV \quad (25)$$

TSV es el tiempo solar verdadero que se relaciona con el tiempo oficial (TO) el que marcan los relojes que usamos en la vida ordinaria a través de la ecuación:

$$\begin{aligned} TSV &= TO - AO + \frac{(\lambda - \lambda_s)}{15} + E_t - 12 \\ E_t &= \frac{229,2}{60} \cdot \begin{bmatrix} 0,000075 + 0,001868 \cdot \cos(\Gamma) - 0,032077 \cdot sen(\Gamma) \\ -0,014615 \cdot \cos(2 \cdot \Gamma) - 0,04089 \cdot sen(2 \cdot \Gamma) \end{bmatrix} \\ \Gamma &= \frac{2 \cdot \pi \cdot (n-1)}{365} \end{aligned} \quad (26)$$

Donde AO es el adelanto oficial sobre el huso horario (en España se toman los valores de 1 y 2 horas para los horarios de invierno y verano respectivamente). $\lambda$ y $\lambda_s$ es la longitud geográfica de una determinada localidad y la longitud del meridiano central del huso correspondiente, respectivamente. Y $E_t$ es la ecuación del tiempo que es la suma algebraica de todas las correcciones que es preciso realizar debido a la excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. es el ángulo del día en radianes.

Al atravesar la atmósfera terrestre la radiación solar extraterrestre se ve sometida a un proceso de atenuación dependiente de la longitud de camino recorrido. Este proceso viene determinado por la altura y la posición del Sol, y también con notable influencia de las variaciones de la composición atmosférica. En un determinado lugar de la superficie terrestre, la radiación solar llega tanto en forma de radiación directa, que no ha sufrido modificación en su dirección desde el Sol, como de radiación difusa, procedente de todas las direcciones de la semiesfera celeste por encima del plano horizontal así como de la reflexión de la radiación por el suelo, la radiación reflejada.

Debido a ello, el flujo de energía que llega a un determinado lugar que se encuentra en la superficie terrestre, se descompone en radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada por la superficie terrestre. Cada una de estas radiaciones se pueden aproximar a partir de diferentes modelos desarrollados en los que se relaciona la radiación solar extraterrestre con la radiación directa, difusa o reflejada a través de unos coeficientes de transmisión que son los que expresan la atenuación que sufre la radiación al penetrar en la atmósfera. En el caso de los firmes, al ser superficies horizontales, se considera que la radiación proveniente del Sol es la radiación directa más la radiación difusa, ya que la radiación reflejada por la superficie terrestre se emite hacia la atmósfera.

Para poder estimar la radiación global medida por un piranómetro, se deben estimar los valores de radiación directa y difusa que inciden sobre una superficie horizontal.

Para el cálculo de la radiación directa, se utiliza el modelo de Hottel, en el cual la transmitancia atmosférica para la radiación directa se calcula en función del ángulo cenital ($\theta_z$), de la altura sobre el nivel del mar ($A$) y del tipo de clima, obteniendo la expresión:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{\left(-k/\cos\theta_z\right)} \quad (27)$$

Donde $_0$, $_1$ y son parámetros ajustados empíricamente que resultan en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_0 &= r_0 \cdot \left[0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - A)^2\right] \\ a_1 &= r_1 \cdot \left[0,5055 + 0,00595 \cdot (6,5 - A)^2\right] \\ k &= r_k \cdot \left[0,2711 + 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2\right] \end{aligned} \quad (28)$$

Estos coeficientes dependen de la altura sobre el nivel del mar ( en kilómetros) y de unos factores de corrección que varían en función del tipo de clima según la Tabla 5.

En el caso de la radiación difusa sobre una superficie horizontal, la transmitancia está dada por una expresión desarrollada por Liu y Jordan (1960), en la que se calcula la transmitancia para la radiación difusa a través de la transmitancia para la radiación directa (27):

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939 \cdot \tau_b \quad (29)$$

Por tanto, las ecuaciones (27) y (29) se proponen como modelo para estimar la radiación global, directa más difusa, que incide sobre el firme. En la Figura 17 se presenta la radiación medida por el piranómetro y la radiación global estimada mediante este modelo empleado para días despejados.

En la Figura 18 se compara la radiación estimada, separada en difusa e incidente, de un día nublado y de un día despejado con la medida por el piranómetro.

## 5.9. DISCUSIÓN

Como se puede observar en la Figura 9, los valores calculados mediante el Modelo CEDEX se ajustan bastante bien en los días completamente despejados. La subida de la temperatura del firme se produce de forma más brusca que la predicha por el modelo. Tal y como indican Han *et al*. (2011), normalmente, el tiempo empleado en subir la temperatura del firme del mínimo al máximo diario es de unas 9 h frente al tiempo empleado en bajar la temperatura del firme del máximo al mínimo, que es de unas 15 h, lo que provoca que no haya simetría en la curva diaria de temperatura del firme. Sin embargo, la curva diaria de la radiación global para los días despejados si que presenta esa simetría (Figura 10).

| Tipo de clima | $r_0$ | $r_1$ | $r_k$ |
|---|---|---|---|
| Tropical | 0,95 | 0,98 | 1,02 |
| Verano, latitud media | 0,97 | 0,99 | 1,02 |
| Verano, subártico | 0,99 | 0,99 | 1,01 |
| Invierno, latitud media | 1,03 | 1,01 | 1,00 |

**TABLA 5.** Factores de corrección para algunos tipos de clima.

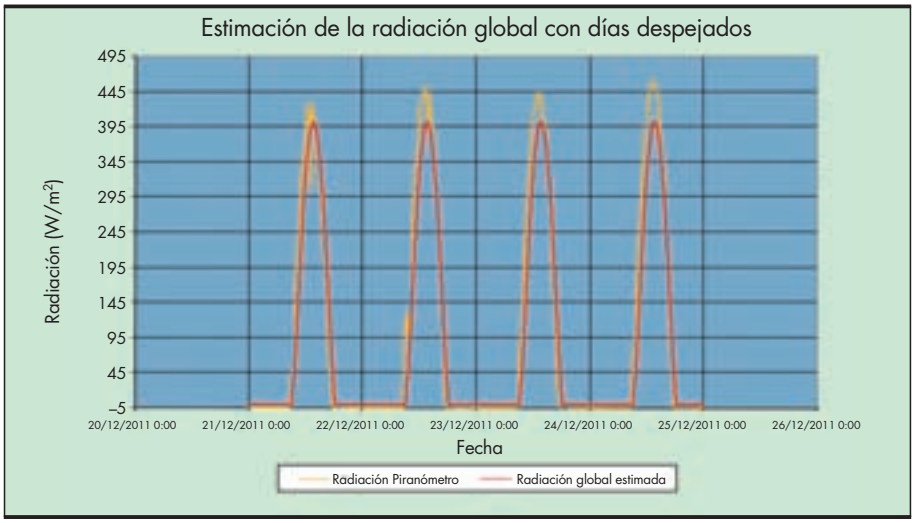



**FIGURA 17.** Estimación de la radiación global con días despejados.

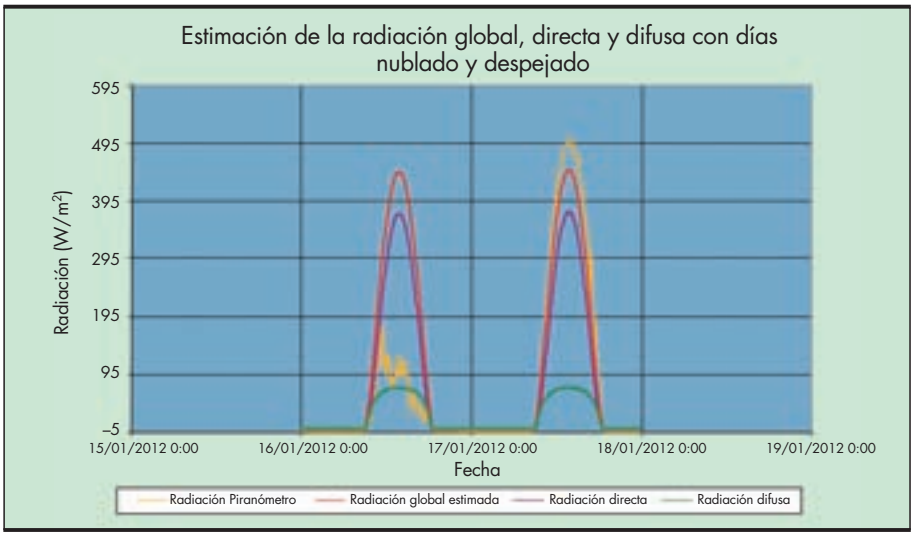



**FIGURA 18.** Estimación de la radiación incidente con día nublado y despejado.

En el caso de los días parcialmente nublados o nublados (Figura 11), el Modelo CEDEX no se ajusta correctamente, debido a la dependencia de la temperatura del firme de otro tipo de factores, como la concentración de humedad en el ambiente, la cantidad de nubes, la velocidad del viento, las precipitaciones, etc. Durante los días parcialmente nublados y nublados, estos factores adquieren mayor protagonismo sobre el valor de la temperatura del firme.

En la validación del Modelo CEDEX (21), el 65% de las desviaciones obtenidas son menores a 4°C. Un 9,5% son mayores a 10°C. Hay que notar, al igual que en el trabajo de Han *et al*. (2011), que no se ha tenido en cuenta el efecto del agua de las precipitaciones sobre la temperatura del firme, por lo que el modelo presenta diferencias significativas con los datos de validación en épocas lluviosas. También hay otros factores ya mencionados que no se han incluido a la hora de desarrollar el modelo ya que el objetivo perseguido fue poder predecir la temperatura del firme con el menor número de variables climáticas de forma que su utilización resultara sencilla y rápida.

Las desviaciones obtenidas para estos días de 2007 se encuentran entre 2°C y 5,3°C (Figura 13). Los errores cometidos por el modelo matemático desarrollado y validado por Hermansson (2000 y 2001) son menores a 2°C para los 30 días de verano empleados en su simulación. En el caso de Minhoto *et al*. (2005) las mayores diferencias entre los valores medidos y los valores calculados son de 4°C. En ambos casos los modelos de temperatura se desarrollaron para datos evaluados cada hora.

El Modelo CEDEX se ajusta bastante bien a los datos empleados para su validación con unas desviaciones promedio entre los 2 y 4°C, al igual que en el caso de Minhoto *et al*. (2005).

Las desviaciones del Modelo CEDEX (Figura 15) en el cálculo de la temperatura máxima diaria del firme se encuentra entre –3°C y 5,6°C y la desviación estándar es de 1,3°C. Hermansson (2001) obtiene unos errores desde 4°C hasta 6°C en las predicciones de las temperaturas máximas del firme a 2,5 cm en la época de verano.

Cuando se compara este modelo con los métodos validados en la primera parte del artículo, se puede observar (Figura 16) como el Modelo CEDEX es el que comete menor error a la hora de predecir las temperaturas máximas, a pesar de que infraestima los valores de temperatura máxima para temperaturas mayores a 5°C. Los algoritmos Superpave y Viljoen, ambos sobreestiman los valores de temperatura máxima, siendo Superpave quien comete mayores errores en la estimación (Figura 16).

Hay que tener en cuenta que el algoritmo Superpave se emplea para predecir la temperatura máxima anual, y se utiliza en la época de verano, que es la época en la que, se supone, se van a producir las temperaturas máximas anuales, y hay que tener en cuenta que en este caso los datos empleados en la comparación del modelo con estos métodos corresponden a la época de invierno (del 27/11/2011 al 31/01/2012), por lo que habrá errores añadidos al emplear Superpave.

En caso de querer extrapolar el modelo y no disponer de datos de radiación global, se propone el uso de un modelo de radiación dado por las ecuaciones (27) y (29). Como se puede observar en la Figura 17 el ajuste del modelo de radiación es bastante bueno para los días despejados.

En el caso de días nublados, la radiación que llega al firme es prácticamente la difusa, como puede apreciarse en la Figura 18, mientras que para un día despejado la radiación que se recoge es la suma de la radiación directa más la difusa (Figuras 17 y 18).

Con este modelo de radiación propuesto se puede predecir la radiación incidente sobre una superficie horizontal en una localización concreta y para un día completamente despejado. En el caso de los días completamente nublados la radiación recibida por la superficie sería radiación difusa, la cual se puede aproximar también con el modelo, sin embargo éste no es capaz de estimar con precisión la radiación para días parcialmente nublados.

## 6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas de los estudios presentados en el artículo son:

- Las temperaturas máximas y mínimas calculadas por los métodos validados en este estudio, Superpave y Viljoen, infraestiman los valores reales de temperatura del firme para nuestra localización geográfica.
- Los errores en la estimación de las temperaturas máximas por estos métodos, Superpave y Viljoen, son mayores a medida que aumenta la profundidad de cálculo.
- Los errores en la estimación de las temperaturas mínimas por ambos métodos son menores a la profundidad de 3 cm que en la superficie del firme.
- La diferencia entre la temperatura real del firme en superficie y a 3 cm según estudios revisados es de aproximadamente 7°C, mientras que los métodos validados basados en la resolución de las ecuaciones de equilibrio energético mayoran esta diferencia.
- En el Modelo CEDEX desarrollado con los datos de la Pista de Ensayo de Firmes las desviaciones para días soleados se encuentran entre 2 y 4°C. En general las desviaciones obtenidas no superan en ningún caso los 8°C, errores que se corresponden con otros modelos del mismo tipo.
- Todos los métodos y modelos validados y desarrollados en estos estudios se ajustan mejor para temperaturas bajas, correspondientes a los meses de invierno, que para temperaturas propias del verano.
- El modelo propuesto en este estudio para la estimación de la radiación global, se ajusta bien para los días soleados y nublados. En el caso de días parcialmente nublados el modelo no reproduce el comportamiento de la radiación global real.

## 7. REFERENCIAS

Barber, E. S. (1957) "Calculation of Maximum Pavement Temperatures From Weather Reports". HRB Bull 168, p 1-8.

Bosscher, P. J., H. U. Bahia, S. Thomas, and J. S. Russell. (1998) "Relationship Between Pavement Temperature and Weather Data: Wisconsin Field Study to Verify SuperPave Algorithm". Transportation Research Record 1609, TRB, pp.1-11.

Canadian Good Roads Association (1963) "Pavement Evaluation Studies in Canada". Proc. Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavement, Univ. of Michigan.

Dempsey, B. J., y Thompson, M. R. (1970) "A Heat-Transfer Model for Evaluating Frost Action and Temperature-Related Effects in Multilayered Pavement Systems". Highway Research Record 342, HRB, pp. 39-56.

Denneman E. (2007) "The application of locally developed pavement temperature prediction algorithms in Performance Grade (PG) binder selection". CSIR, PO Box 395 Pretoria, 0001, South Africa.

Diefenderfer, B., Al-Qadi, I., Reubush, S. D., y Freeman, T. E. (2003) "Development and Validation of a Model to Predict Pavement Temperature Profile". Transportation Research Record, TRB.

Dorman, G. M. (1963) "The Extension to Practice of a Fundamental Procedure for the Design of Flexible Pavements". Proc. Internat.Conf. on Structural Design of Asphalt Pavement, Univ. of Michigan.

Elizondo, F., Badilla, G., y Ulloa, A. (2008) "Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak". Revista Infraestructura Vial, Vol. 10 (#19), 38-48.

Han, R., Jin, X., y Glover, C.J. (2011) "Modeling Pavement Temperature for Use in Binder Oxidation Models and Pavement Performance Prediction". Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 351-359.

Hermansson, A. (2001) "Mathematical Model for Calculation of Pavement Temperatures: Comparison of Calculated and Measured Temperatures". Transportation Research Record 1764, TRB, pp. 180-188.

Hermansson, A. (2000) "Simulation Model for Calculating Pavement Temperatures Including Maximum Temperature". Transportation Research Record 1699, TRB, pp. 134-141.

Jimenez, Rudolf A., y Gallaway, Bob M. (1963) "Behavior of Asphaltic Concrete Diaphragms to Repetitive Loadings". Proc. Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavement, Univ. of Michigan.

Kallas, B. F. (1966) "Asphalt Pavement Temperatures". Highway Research Record 150, p.1-11.

Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harringan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Von Quintis, H., Moultrop, J.S. (1994) "Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE): The product of the SHRP asphalt research program". Report no: HRP-A-410, Strategic Highway Research Program, Washington.

Liang, R. Y., Rabab'ah, S., y Al-Akhras, K. (2006) "Validation of enhanced integrated climatic model prediction over different drainable base materials". Transportation Research Board Annual Meeting (CD-ROM), Washington, DC.

Luca, J., y Mrawira, D. M. "New Measurement of Thermal Properties of Superpave Asphalt Concrete". Journal of Materials in Civil Engineering, 17, pp. 72-79, 2005.

Lytton, R. L., Pugahl, D. E., Michalak, C. H., Liang, H. S., y Dempsey, B. J. (1989) "An Integrated Model of the Climatic Effects on Pavements". Rep. FHWA-RD-90-033, Texas Transportation Institute, College Station, TX.

Minhoto, Manuel J. C., Pais, Jorge C., Pereira, Paulo A. A. y Picado-Santos, Luis G. (2005) "Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Method". Transportation Research Record, 1919, p. 96-110.

Monismith, Carl L. (1961) "Asphalt Mixture Behaviour in Repeated Flexure". Proc. AAPT, vol. 30.

Viljoen, A. W. (2001) "Estimating Asphalt temperatures from air temperatures and basic sky parameters". Internal report, Transportek, CSIR, Pretoria.

# EDICIONES DEL CEDEX

## OBRAS PÚBLICAS DE ESPAÑA 1878

Con este primer número, en soporte digital, da comienzo una nueva colección, promovida por CEHOPU, cuyo objetivo es dar a conocer obras documentales significativas, ya sean gráficas o literarias, del patrimonio de las obras públicas españolas.
En esta ocasión se publican unos álbumes que fueron llevados a la Exposición Universal de París de 1878 y cuya finalidad fue mostrar al mundo la obras públicas que había en España en aquel momento. De ellos, los que ahora mostramos contienen documentación planimétrica dibujada a mano de gran belleza e interés; el álbum de fotografías, "Puentes de hierro", destaca por la calidad de las imágenes, todas ellas realizadas por J. Laurent y J. Martínez Sánchez, afamados fotógrafos del momento.
El cd-rom se acompaña de un cuaderno con un estudio sobre las exposiciones universales decimonónicas y las obras públicas, así como la relación de las láminas que componen los cinco álbumes.

**Nº de páginas: 48**
**Año de edición: 2007**
**P.V.P.: 10€**

**Nº de páginas: 56**
**Año de edición: 2008**
**P.V.P.: 10€**

## UN VIAJE DE AGUA DE SUBIZA A PAMPLONA

En esta publicación se muestra una selección documental de la primera infraestructura de abastecimiento de agua potable a Pamplona. Siguiendo un orden cronológico, estructurado en ocho capítulos, el trabajo muestra los distintos dispositivos técnicos para superar la diferencia de cota topográfica, característicos de cada proyecto planteado. El soporte digital contiene la totalidad de la cartografía histórica conservada (planos de François de Gency, Ventura Rodríguez o Juan de Villanueva, entre otros), además de una selección de informes técnicos procedentes del Archivo Municipal de Pamplona y de la Institución Príncipe de Viana. Todo ello ayudará al lector a tener una visión global, que llega hasta la actualidad, de cada uno de los proyectos que se plantearon para realizar la obra.

**Nº de páginas: 48**
**Año de edición: 2008**
**P.V.P.: 10€**

## EL ALTO GUADIANA Y LAS LAGUNAS DE RUIDERA (1765-1919)

Con motivo del 75 aniversario de la declaración de Lagunas de Ruidera como espacio natural protegido se presenta esta publicación, que pretende acercarse a la labor llevada a cabo por los ingenieros y técnicos del medio físico de uno de los humedales más emblemáticos de la Península Ibérica. En ella se dan a conocer las primeras tomas de datos o levantamientos cartográficos. El cd-rom que acompaña a la publicación contiene una exhaustiva recopilación cartográfica constituida por planos y mapas cronológicamente encuadrados entre los siglos XVIII al XX procedentes de diversas instituciones entre ellas, la más destacada, el Archivo del Ministerio de Fomento.

# EDICIONES DEL CEDEX

## LOS PAISAJES DEL AGUA DE LA CUENCA DEL EBRO

**Nº de páginas: 47**
**Año de edición: 2009**
**Edición: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones**
**P.V.P.: 10€**

Esta publicación es el resultado del trabajo realizado por un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma de Madrid cuyo fin ha sido el inventariar todas aquellas infraestructuras hidráulicas que se han ido construyendo a lo largo de los siglos en la cuenca del río Ebro, y cuyas fuentes documentales se encuentran en la actualidad en los archivos de la Administración. En el soporte digital se puede, por un lado, acceder a los datos que sean de interés para el lector y, por otro, a modo de muestra, se puede visualizan una selección de la documentación gráfica inventariada.

## INFRAESTRUCTURAS Y APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS EN CANTABRIA

**Nº de páginas: 47**
**Año de edición: 2009**
**Edición: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones**
**P.V.P.: 10€**

Este trabajo, que se realizó gracias a las ayudas a la investigación que convoca el CEHOPU todos los años, ha dado como resultado un catálogo documental y gráfico sobre los antiguos aprovechamientos hidráulicos en los ríos Nansa, Ebro, Pas y Pisueña. Por su concepción y metodología, así como la información que contiene, su vocación es convertirse en documento de consulta obligada para cualquier intervención sobre este patrimonio de los ríos de Cantabria.

## LA REVISTA ANALES DE LA CONSTRUCCIÓN Y DE LA INDUSTRIA (1876-1890)

**Nº de páginas: 47**
**Año de edición: 2009**
**Edición: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones**
**P.V.P.: 10€**

En el siglo XIX, particularmente en su segunda mitad, se asiste al despegue en España de las publicaciones periódicas de contenido científico y técnico. Una de ellas es "Anales de la Construcción y de la Industria" (1876-1890), dirigida por el ingeniero de caminos y arquitecto Eduardo Saavedra, en la que se da cabida a todo tipo de artículos y noticias, recorriendo la actualidad de las obras públicas, la arquitectura, la industria, los inventos, la minería o las exposiciones de la época.
Con el fin de conservar y difundir el patrimonio bibliográfico se ha digitalizado la totalidad de la revista. En el soporte digital se puede consultar el contenido de los 15 años de vida de la publicación y, a través de una exhaustiva base de datos, realizar todo tipo de consultas. El dvd se acompaña de un estudio introductorio sobre las revistas científicas de la época, profundizando en lo que significaron los Anales, y de un análisis bibliométrico que ayuda a su comprensión.

## DICCIONARIO GENERAL DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA DE PELAYO CLAIRAC

**Nº de páginas: 45**
**Año de edición: 2010**
**Edición: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones**
**P.V.P.: 10€**

Aunque exista en España una larga tradición de diccionarios, fue con la Ilustración y sobre todo en el siglo XIX cuando se empiezan a elaborar diccionarios especializados. En el caso de esta obra su autor, Pelayo Clairac, ingeniero de Caminos y coetáneo y amigo de Eduardo Saavedra y José Echegaray, tuvo como primer objetivo "llenar un vacío editorial y compilar un espacio de lenguaje técnico". Su publicación se inició en 1877 por entregas mensuales, pero la obra quedó inconclusa por el fallecimiento de Clairac en 1908.
Hay que destacar el estudio introductorio de Inmaculada Aguilar Civera que informa sobre la trayectoria profesional del autor y ahonda en el contenido de su obra. En el soporte digital se puede visualizar la totalidad del Diccionario, así como realizar todo tipo de consultas.

## Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid
Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: +(34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

# EDICIONES DEL CEDEX

**Nº de páginas: 70**
**Año de edición: 2007**
**P.V.P.: 10€**

## SALTO HIDROELÉCTRICO DE EL CHORRO. ESTUDIO PARA LA RESTAURACIÓN DEL "CAMINITO DEL REY"

Esta publicación inicia una nueva colección, en formato digital, cuya intención es difundir desde CEHOPU estudios y trabajos de investigación sobre la historia de las obras públicas que puedan ser de interés tanto para estudiosos del tema como para el público en general.
El primer número es del resultado de una de las ayudas a la investigación convocadas por el Centro en el año 2006, y expone un ambicioso proyecto de recuperación del llamado "Caminito del Rey", una vía de comunicación íntimamente relacionada con la central de El Chorro (Málaga), que permitirá recomponer un sugestivo patrimonio técnico, histórico, natural y paisajístico. El cd-rom contiene la investigación completa en la que se incluyen los estudios histórico, documental, ambiental, de sostenibilidad y viabilidad, se completa con los anejos de planimetría, de análisis de la estructura y la bibliografía. Se acompaña de un cuaderno en el que se presenta un resumen de la investigación.

**Nº de páginas: 80**
**Año de edición: 2007**
**P.V.P.: 10€**

## ANÁLISIS Y VALORACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO DE LAS CARRETERAS ESPAÑOLAS 1748-1936

Los autores, a través de una selección de casos de estudio, tratan de poner en valor el valioso patrimonio de las carreteras españolas. Es de sumo interés, en cuanto que describe el contexto histórico, la primera parte de la publicación, ya que a través de ella se puede después analizar la increíble evolución que han tenido los caminos españoles en el periodo que nos ocupa. Hay que destacar la labor de campo realizada por los autores que ha dado como resultado una abundante documentación gráfica que rescata del pasado numerosos elementos (antiguos mojones, casas de peones camineros, por ejemplo) que ya han pasado a formar parte de nuestro rico patrimonio histórico. La abundante aportación cartográfica permite el análisis global de la situación anterior y actual.
Esta publicación recoge el resultado del proyecto que, con el mismo nombre, recibió una de las ayudas otorgadas por el CEHOPU en la convocatoria 2006

## LOS MOLINOS HIDRÁULICOS DEL GUADALQUIVIR EN LA CIUDAD DE CÓRDOBA: ESTUDIO HISTÓRICO Y ARQUITECTÓNICO

Los molinos hidráulicos establecidos sobre el río Guadalquivir en la ciudad de Córdoba son construcciones centenarias que llevan prestando servicio a la producción industrial de la ciudad desde hace cientos de años. En esta publicación el profesor Córdoba de la Llave y su equipo recorren cada uno de ellos, estudiando detenidamente su evolución histórica y arquitectónica. Se llega, por tanto, a la conclusión de que con la profundización en el conocimiento de estos edificios se pueden acometer proyectos de conservación y restauración, así como estudiar posibles usos alternativos adaptados a la sociedad del siglo XXI.

**Nº de páginas: 102**
**Año de edición: 2008**
**P.V.P.: 10€**

# EDICIONES DEL CEDEX

**Nº de páginas: 174**
**Año de edición: 2008**
**P.V.P.: 10€**

## LOS PEQUEÑOS PUERTOS ASTURIANOS DURANTE LOS SIGLOS XIX Y XX Y LOS SISTEMAS INDUSTRIALES LOCALES

Los pequeños puertos asturianos constituyeron una de las claves del sistema productivo de la región durante buena parte de los siglos XIX y XX apoyados en los recursos de mar. Así la actividad pesquera de este periodo pasó de ser un mero recurso de subsistencia a convertirse en actividad pujante. El alcance de este trabajo se motiva por la escasez de estudios que sobre este tema se han hecho. El libro comienza con una introducción histórica, le sigue la metodología utilizada en el estudio, la descripción general de la evolución de los pequeños puertos astures y se termina con una descripción detallada de quince de ellos, entre los que se encuentran Vegadeo, Luarca, Llanes o Lastres.

**Nº de páginas: 105**
**Año de edición: 2009**
**Edición: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones**
**P.V.P.: 10€**

## EL CAMINO DE VALENCIA EN ALARCÓN Y CONTRERAS (1845-1998). ANÁLISIS DE VIABILIDAD PARA SU RECUPERACIÓN COMO CARRETERA HISTÓRICA

Los autores en esta publicación han realizado un análisis exhaustivo de los elementos patrimoniales de esta carretera, además de un inventario final, con el fin de ver la posibilidad de su recuperación como carretera histórica. El libro contiene una abundante documentación gráfica y sugiere una serie de mejoras para que sea posible su reconocimiento como patrimonio vial. Este libro, por otra parte, recoge el resultado del proyecto que, con el mismo nombre, recibió una de las ayudas otorgadas por el CEHOPU en la convocatoria 2008.

**Nº de páginas: 49**
**Año de edición: 2009**
**Edición: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones**
**P.V.P.: 10€**

## EL DEPÓSITO DE TORROJA EN LA JUNTA DE ENERGÍA NUCLEAR : ESTUDIO SOBRE SU ESTADO ACTUAL

En la sede de la antigua Junta de Energía Nuclear, actualmente instalaciones del CIEMAT, Eduardo Torroja construyó en 1958, además de otros, un depósito de ladrillo que impermeabilizó mediante el pretensado de la cuba por medios muy poco convencionales, buscando simplificar la construcción y utilizar materiales baratos. Este depósito ha permanecido hasta hoy lo que ha permitido al autor hacer una investigación pormenorizada de su estado. El libro contiene una memoria explicativa del trabajo y siete anejos, el último de los cuales resume el sistema de construcción.

**Nº de páginas: 118. Año de edición: 2010. P.V.P.: 10€**
**Edición: Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones**

## LA RECUPERACIÓN DEL JARDÍN DE WINTHUYSEN DE LA ANTIGUA ESCUELA DE CAMINOS EN EL CERRILLO DE SAN BLAS

En el Cerrillo de San Blas, situado junto al parque de El Retiro, se encuentran diversas construcciones de diferentes épocas; una de ellas, construida entre 1881 y 1882, fue sede de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos hasta que se trasladó a la Ciudad Universitaria. En 1926-27 Javier de Winthuysen proyectó un jardín ante la fachada del edificio que en años posteriores sufrió una enorme degradación. Esta publicación recoge el proyecto de recuperación del jardín histórico y la reordenación de su entorno, realizado por el arquitecto Gerhard Loch, y promovido por el CEDEX- CEHOPU con la colaboración de la Universidad Politécnica de Madrid. Las obras se iniciaron en 2008 y el jardín se abrió de nuevo al público en septiembre de 2009.

## Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid
Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: +(34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

# Ingeniería Civil

## Normas de redacción y publicación de artículos

### Información general

La revista Ingeniería Civil, editada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas es una publicación científica destinada a un público especializado en los campos de ingeniería civil y medioambiental. Es una revista arbitrada que utiliza el sistema de revisión por pares y en la que son objeto de evaluación externa todos los trabajos recibidos. Acepta para su publicación trabajos de investigación especializados cuya cobertura temática cubre los campos de ingeniería civil y medioambiental, hidrología, transporte, geotecnia, materiales de construcción, puertos y costas e historia de las obras públicas, con el objetivo de dar a conocer la tecnología más avanzada y su contribución al desarrollo de las obras públicas.

Las personas interesadas en publicar sus artículos en la revista Ingeniería Civil, deben dirigir sus trabajos al Secretario de la revista de Ingeniería Civil. C/ Alfonso XII, 3 y 5, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Edificio CETA), 28014 Madrid, España, o bien, a las siguientes direcciones de correo electrónico:

ana.garcia@cedex.es, alejandro.d.martos@cedex.es, olga.sanchez@cedex.es, o ingcivil@cedex.es.

En cualquier caso, será indispensable entregar el artículo en soporte digital.

Los originales deberán seguir, siempre que sea posible la siguiente estructura: resumen, palabras clave, texto (introducción, material y métodos, resultados y discusión), agradecimientos y bibliografía.

### Presentación de los trabajos

Con carácter general, la extensión máxima del texto será de 40 páginas tamaño DIN-A4, (en formato Word), escritas a doble espacio, cuerpo de letra 12. En casos excepcionales podrán publicarse artículos de mayor extensión, que quedarán igualmente al criterio y aprobación del Comité de Redacción.

El artículo se acompañará de una **carta de presentación** en la que se solicite la consideración del artículo y en la que, además, el autor explicará en 4-5 líneas, cual es la aportación original del trabajo que presenta y sus novedades, la declaración de no envío simultáneo a otras revistas y la confirmación de las autorías firmantes. Asimismo, en esta carta figurará la cesión de todos los derechos al editor.

Los Artículos se presentarán de acuerdo al siguiente orden y estructura:

Título del artículo: Conciso pero informativo, en castellano e inglés.

Nombre y dos apellidos de cada uno de los autores. En el caso del primer autor, se añadirá la dirección del correo electrónico. Se incluirán las referencias profesionales y académicas de los autores.

Información sobre becas, ayudas o soporte financiero con el que se ha contado (Proyectos de Investigación) para la subvención del trabajo y otras especificaciones, cuando sea el caso. Debe aportarse también el título traducido al inglés.

Resumen del trabajo: Será de una extensión entre 200-250 palabras y tendrá dos versiones, una en castellano y otra en inglés.

Palabras clave: Tendrá dos versiones, una en castellano y otra en inglés. Se especificarán entre 5-10 palabras clave que identifiquen el contenido del trabajo, y para facilitar su inclusión los repertorios y bases de datos nacionales e internacionales. Se recomienda utilizar términos controlados de referencia extraídos del *Thesaurus of Engineering and Scientific Terms, publicado por The American Association of Engineering Societies, Washington, D.C.* y disponible en la web:

http://www.amazon.com/Thesaurus-Engineering-Scientific-EngineersCouncil/dp/0685092895

Texto del Artículo: Los trabajos deben ir, si la estructura y contenidos así lo permiten, divididos en los siguientes apartados: Introducción, Material y Métodos, Resultados y Discusión.

Introducción: Debe incluir los fundamentos y el propósito del estudio, utilizar las citas bibliográficas estrictamente necesarias. No incluirá datos o conclusiones del trabajo que se presenta ni realizará una revisión bibliográfica detallada.

Material y métodos: Las fuentes y métodos previamente publicados deben describirse sólo brevemente y aportar las correspondientes citas, excepto que se hayan realizado modificaciones en los mismos. Se describirá el cálculo utilizado y la forma de muestreo, en su caso. Se hará referencia al tipo de análisis crítico, estadístico, etc., empleado (indíquese el que proceda según área de conocimiento). Si se trata de una metodología original, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y escribir sus posibles limitaciones. Cuando se haga referencia a sustancias o productos químicos o materiales debe indicarse el nombre genérico.

Resultados: Aparecerán en una secuencia lógica en el texto, tablas o figuras. No se repetirán en todas ellas los mismos datos ya recogidos en el texto. Se procurará resaltar las observaciones importantes. Se describirán, sin interpretar ni hacer juicios de valor, las observaciones efectuadas con el material y métodos empleados.

Discusión: Resumirá los hallazgos, relacionando las propias observaciones con otros estudios de interés, y señalará las aportaciones y limitaciones de unos y otros. No se deben repetir con detalle los datos u otro material ya comentado en otros apartados. Mencionar las inferencias de los hallazgos y sus limitaciones, incluyendo las deducciones para una investigación futura.

Es adecuado enlazar las conclusiones con los objetivos del estudio, evitar las afirmaciones gratuitas y las conclusiones no apoyadas completamente por los datos del trabajo.

Agradecimientos: Únicamente se agradecerá su colaboración a personas que hayan hecho contribuciones sustanciales al estudio.

Citas en el texto: Autor y año entre paréntesis. Cuando el autor forma parte de la argumentación sólo el año entre paréntesis. Cuando se cita varias veces a un mismo autor pero a distinta obra del mismo año, se le añade a, b, c.

> …procedimiento de cimentación suficientemente acreditado (Redwood and Jain 1992)]. Asimismo, Van der Sanden and Hoekman (2005) propusieron……En otras situaciones (Redwood and Jain 1992a) la cimentación…..

Para la elaboración de las referencias se recomienda el seguimiento de la norma ISO 690 o los criterios de los ejemplos descritos a continuación:

**Artículo de una revista:**

APELLIDO(S), Nombre. Título del artículo. Responsabilidad secundaria. Título de la publicación seriada. Edición. Localización en el documento fuente: año, número, páginas.

Ejemplo:
REDWOOD, R.G., JAIN, A.K. *Code provisions for seismic design for concentrically braced steel frames* Canadian Journal of Civil Engineering, 1992. Vol 19, Nº 6. 1025–1031.

**Libro:**

APELLIDO(S), Nombre. *Título del libro*. Mención de responsabilidad secundaria (traductor; prologuista; ilustrador; coordinador; etc.)*. Nº de edición. Lugar de edición: editorial, año de edición. Nº de páginas*. Serie*. Notas*. ISBN

Ejemplo:
BOBBIO, Norberto. *Autobiografía*. Papuzzi, Alberto (ed. lit.); Peces-Barba, Gregorio (prol.); Benitez, Esther (trad.). Madrid: Taurus, 1988. 299 p. ISBN: 84-306-0267-4

**Parte de un libro:**

APELLIDO(S), Nombre. Título de la parte. En: Título de la obra. Edición. Lugar de edición: editorial, año de edición. Situación de la parte en la obra.

Ejemplo:
HEALEY, M.C. The ecology of juvenile salmon in Georgia Strait, British Columbia. En: Salmonid ecosystems of the North Pacific. Editado por W.J. McNeil, D.C. Himsworth. Corvallis, Oregon. State University Press. 1980. pp. 203–229.

**Ponencias de congresos: Referencia similar a una parte de un libro**

APELLIDO(S), Nombre. "Título de la parte". En: APELLIDO(S), Nombre. Título de la obra completa. Responsabilidades secundarias*. Nº de edición. Lugar: editorial, año de publicación. Serie*. ISBN

**Informe:**

APELLIDO(S), Nombre. *Título del informe.* Lugar de publicación: editorial, año. Serie, nº de la serie. (Disponibilidad)

SANDERS, W.W., Jr., ELLEBY, H.A. Distribution of wheel loads in highway bridges. National Cooperative Highway Research Program Report 83, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1970.

**Documentos Electrónicos:**

Responsable principal. *Título* [tipo de soporte]. Responsables secundarios*. Edición. Lugar de publicación: editor, fecha de publicación, fecha de actualización o revisión, [fecha de consulta]**. Descripción física*. (Colección)*. Notas*. Disponibilidad y acceso** . Número normalizado*

Ejemplo:
U.S. ISBN Agency. *The Digital World and the Ongoing Development of ISBN* [en línea]. New Providence, N.J.: RR Bowker, s.d. [ref. de 16 de agosto 2002]. Disponible en Web: http://www.isbn.org/standards/home/isbn/digitalworld.asp>.

El listado bibliográfico debe ser corregido por el autor, comparándolo con la copia en su poder. Se evitará utilizar como citas bibliográficas frases imprecisas. No pueden emplearse como tales las que precisen de aclaraciones como "observaciones no publicadas", ni "comunicación personal", aunque sí podrán citarse dentro del texto entre paréntesis. Los trabajos aceptados, pero aún no publicados, se incluirán en las citas bibliográficas especificando el nombre de la revista, seguido por la expresión "en prensa".

Figuras (Tablas): Serán consideradas figuras todo tipo de imágenes fotografías, gráficas o dibujos. Se ordenarán según orden de aparición en el texto, y serán identificadas por el término abreviado fig. n° o, en su caso, tabla n°. Los títulos o pies que las acompañen deben explicar perfectamente el contenido de las mismas. Se exige que tengan una resolución mínima de 300 ppp.

## Proceso editorial

Los trabajos se remitirán acompañados de una carta de presentación, en la que se solicitará la evaluación para su publicación en alguna de las secciones de la Revista, con indicación expresa de que se trata de un trabajo que no ha sido difundido ni publicado anteriormente, que se envía únicamente a la revista Ingeniería Civil para su evaluación y publicación, si procede, así como las aportaciones en cuanto a originalidad y novedad que, a juicio de los autores, plantea el trabajo.

La redacción de la Revista acusará recibo a los autores de los trabajos que le lleguen y posteriormente informará de su aceptación o rechazo.

La redacción pasará a considerar el trabajo para su publicación por el Comité Editorial, para lo que comprobará si se adecua la cobertura de la revista y cumple las normas de publicación. En tal caso se procederá a su revisión externa.

Los artículos serán revisados de forma anónima por dos expertos en el objeto de estudio y/o metodología empleada. La redacción de la Revista, a la vista de los informes externos, se reserva el derecho de aceptar/rechazar los artículos para su publicación, así como el de introducir modificaciones de estilo y/o acortar los textos que sobrepasen la extensión permitida, con el compromiso, en tal supuesto, de respetar el contenido del original.

Los autores/as de artículos aceptados recibirán las pruebas de imprenta para su corrección por correo electrónico. Deberán devolverlas corregidas a la redacción de la Revista dentro de la semana siguiente a su recepción.

# CEDEX

## Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

| | |
|---|---|
| DIRECCIÓN<br>Director: **Mariano Navas Gutiérrez**<br><br>SECRETARÍA<br>Secretario: **Manuel Echeverría Martínez** | Calle de Alfonso XII, 3<br>28014 MADRID<br>• Telf.: 913 357 500<br>• Télex: 45022 CEDEX E<br>• Fax: 915 280 354 |
| RELACIONES EXTERNAS Y ACTIVIDADES COMERCIALES<br>Jefe: **Miguel González Portal** | Telf.: 913 357 490 • Fax: 913 357 538 |
| CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS<br>Director: **José María Grassa Garrido** | Calle Antonio López, 81 • 28026 MADRID<br>Telf.: 913 357 700 • Fax: 913 357 622 |
| CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS<br>Director: **Federico Estrada Lorenzo** | Paseo Bajo de la Vírgen del Puerto, 3 • 28005 MADRID<br>Telf.: 913 357 900 • Fax: 913 357 922 |
| CENTRO DE ESTUDIOS DEL TRANSPORTE<br>Director: **Antonio Sánchez Trujillano** | Autovía de Colmenar Viejo, km 18,2<br>28049 El Goloso (MADRID)<br>Telf.: 913 357 800 • Fax: 913 357 822 |
| CENTRO DE ESTUDIOS DE TÉCNICAS APLICADAS<br>Director: **Alberto Compte Anguela** | Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID<br>Telf.: 913 357 200 • Fax: 913 357 249 |
| LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES<br>Director: **José Manuel Gálligo Estévez** | Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID<br>Telf.: 913 357 400 • Fax: 913 357 422 |
| LABORATORIO DE GEOTECNIA<br>Director: **Fernando Pardo de Santayana Carrillo** | Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID<br>Telf.: 913 357 300 • Fax: 913 357 322 |
| LABORATORIO DE INTEROPERABILIDAD FERROVIARIA<br>Director: **Jaime Tamarit Rodríguez** | Calle Julián Camarillo, 30 • 28037 MADRID<br>Telf.: 913 357 150 • Fax: 913 357 197 |
| CENTRO DE ESTUDIOS HISTÓRICOS DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (CEHOPU) | Calle de Zurbano, 7 • 28010 MADRID<br>Telf.: 913 489 800 • Fax: 913 489 816 |

# Ingeniería Civil

## Boletín de suscripción

Email: ingcivil@cedex.es Teléfono: 91 335 72 69

España un año: **49 €** Extranjero un año: **81,12 €**

☐ Empresa N.I.F. ..... ☐ Particular N.I.F. .....

Nombre ..... Cargo .....

Dirección .....

..... Código Postal .....

Población ..... Provincia .....

Teléfono ..... Fax ..... E-mail .....

### Formas de Pago

(Elíjase solamente una opción)

☐ Domiciliación bancaria (Solamente para cuentas bancarias en España)

Muy Sres. míos:

Ruego que, con cargo a mi cuenta y hasta nuevo aviso, atiendan el pago de los recibos correspondientes a mi suscripción que les presentará al cobro la REVISTA INGENIERIA, editada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX.

Les saluda atentamente

Entidad bancaria .....

Domicilio entidad .....

C.P. ..... Localidad ..... Provincia .....

| Entidad | Oficina | D.C. | Núm. de cuenta |
|---|---|---|---|
| | | | |

☐ Transferencia a favor del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX

Cuenta del CEDEX (desde España): **0182 - 2370 - 45 - 0200200574**

Cuenta del CEDEX (desde el extranjero): IBAN: **ES6501822370450200200574**

SWIFT: **BBVAESMM**

☐ Cheque nominativo a favor del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX

Fecha ..... Firma

El Titular, Fdo. .....

**Enviar a:**

Revista **Ingeniería Civil** (PUBLICACIONES)

Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX • c/ Alfonso XII, 3 • 28014 Madrid

**desde nuestra página web**

**www.cedex.es**

ferrovial
agroman

# Crecimiento basado en la Innovación

Ferrovial Agromán apuesta por la innovación y el desarrollo, así como por la aplicación de nuevas tecnologías en todos los ámbitos de su actividad de diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras.

Con más de 80 años de experiencia y más de 50 años de actividad en 50 países de 5 continentes distintos y más de 650 proyectos realizados con éxito, Ferrovial Agromán es pionera en el proceso de internacionalización de su actividad y referente en la aplicación de las técnicas más avanzadas en la ejecución de sus obras.