

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.cadauid@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 atmósfera 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:

$$q_S = (1 - \alpha) \cdot R_{solar} \quad (1)$$

α : 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):

$$q_a = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{aire}^4 \quad (2)$$

ε_a : Coeficiente de absorción de la superficie del firme para radiación de onda larga y la cantidad de nubes.

σ : 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):

$$q_r = \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (3)$$

ε_e : Coeficiente de emisión de la superficie del firme.

σ : Constante de Stefan-Boltzman.

T_s : Temperatura de la superficie del firme en °K.

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:

$$h_c = 698,24 \cdot a \cdot \left(0,00144 \cdot \left(\frac{T_s + T_{aire}}{2} \right)^{0,3} \cdot U^d + 0,00097 \cdot (T_s - T_{aire})^{0,3} \right) \quad (5)$$

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 a y d 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.

ρ : 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:

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{\Delta x}{2}\right) \cdot \left(\frac{\partial T_s}{\partial t}\right) = q_s + q_a - q_r - q_c - q_f$$

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{\Delta x}{2}\right) \cdot \left(\frac{\partial T_s}{\partial t}\right) = (1 - \alpha) \cdot R_{solar} + \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{aire}^4 - \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot T_s^4 - h_c \cdot (T_s - T_{aire}) + k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_s \quad (8)$$

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):

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{3m} = \text{independiente de } x \quad (9)$$

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).

σ : 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:

$$T_{d(\max)} = (T_{s(\max)} + 17,8) \cdot (1 - 2,48 \cdot 10^{-3} \cdot d + 1,085 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 - 2,441 \cdot 10^{-8} \cdot d^3) - 17,8 \quad (12)$$

$$T_{d(\min)} = T_{s(\min)} + 5,1 \cdot 10^{-2} \cdot d - 6,3 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 \quad (13)$$

$T_{s(\max)}$: 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:

$$T_{s(\max)} = T_{a(\max)} - 24,5 \cdot (\cos(Z_n))^2 \cdot C \quad (14)$$

$T_{s(\max)}$: 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 $T_{a(\max)} > 30^\circ\text{C}$.

C = 1,0 si la media de la T mensual del aire $< T_{a(\max)} < 30^\circ\text{C}$.

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:

$$\cos(Z_n) = \text{seno}(\text{Latitud}) \cdot \text{seno}(\text{Declinación}) + \cos(\text{Latitud}) \cdot \cos(\text{Declinación}) \quad (15)$$

Y la declinación es función del día del año para el cual se predice la temperatura máxima de la superficie del firme:

$$\text{Declinación} = -23,45^\circ \cdot \cos\left[\frac{360^\circ}{365} \cdot (N + 10)\right] \quad (16)$$

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:

$$T_{d(\max)} = T_{s(\max)} \cdot (1 - 4,237 \cdot 10^{-3} \cdot d + 2,95 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 - 8,53 \cdot 10^{-8} \cdot d^3) \quad (18)$$

$$T_{d(\min)} = T_{s(\min)} + 3,7 \cdot 10^{-2} \cdot d - 6,29 \cdot 10^{-5} \cdot d^2 \quad (19)$$

$T_{s(\max)}$: 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 superficie 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.

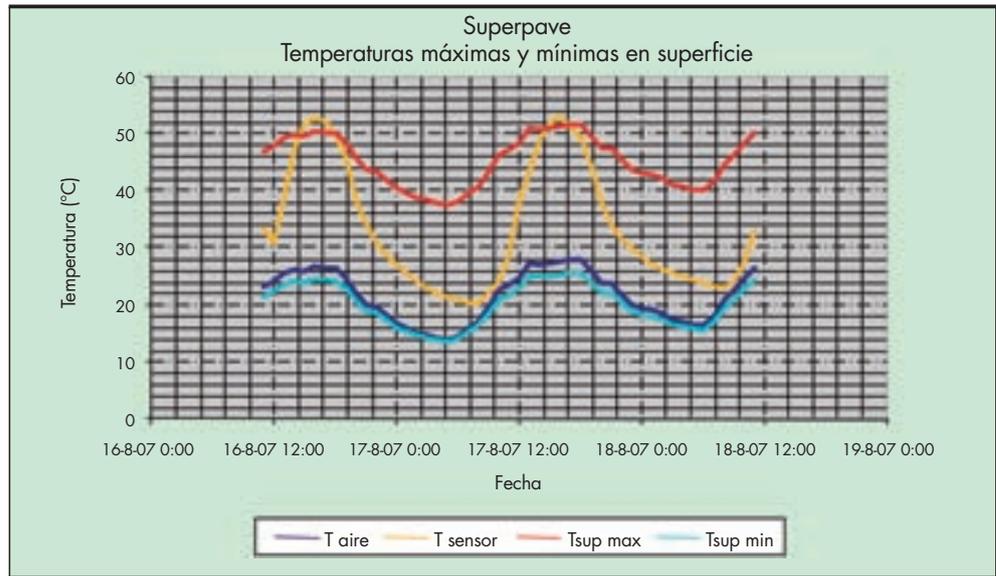


FIGURA 1. Temperaturas máximas y mínimas en superficie con Superpave.

- $T_{sup\ max}$: 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.

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 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.

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.

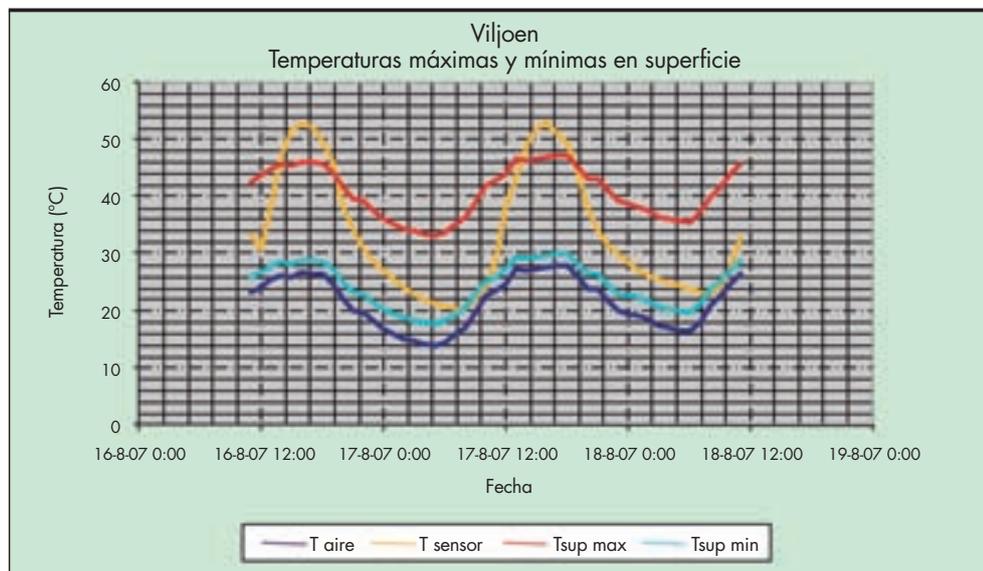


FIGURA 2. Temperaturas máximas y mínimas en superficie con Viljoen.

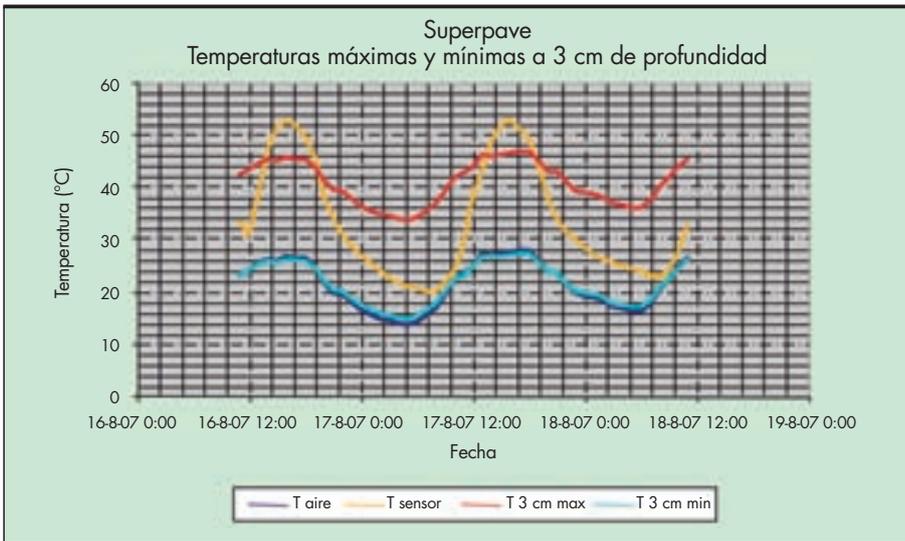


FIGURA 3. Temperaturas extremas a 3 cm con Superpave.

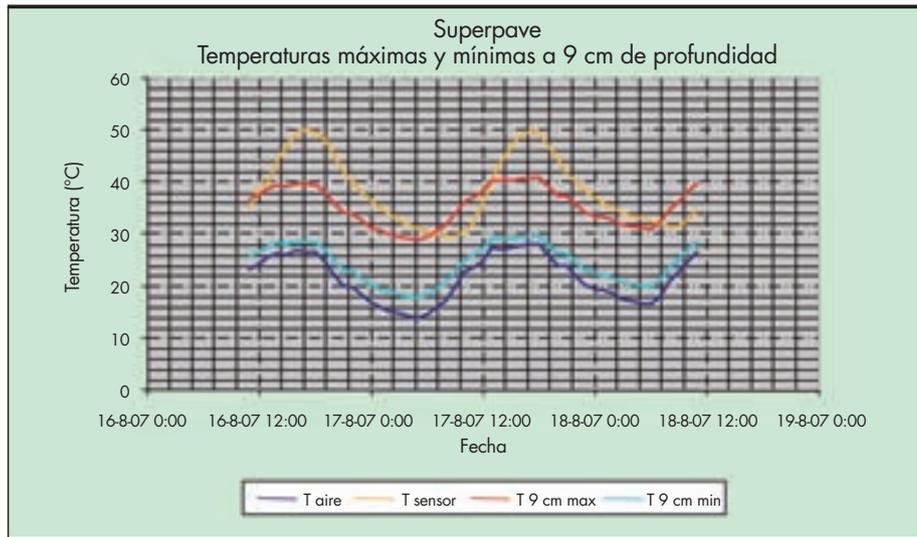


FIGURA 4. Temperaturas extremas a 9 cm con Superpave.

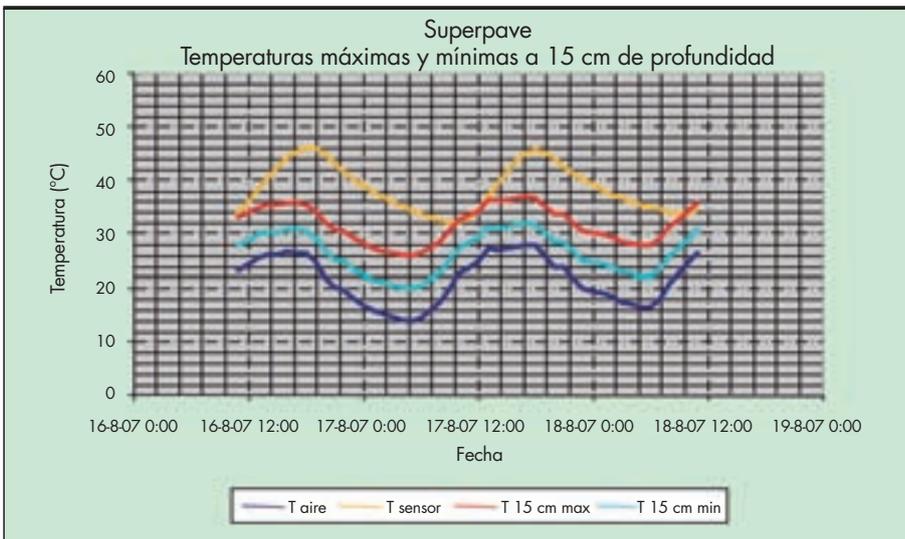


FIGURA 5. Temperaturas extremas a 15 cm con Superpave.

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 tem-

peratura 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. En el 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.

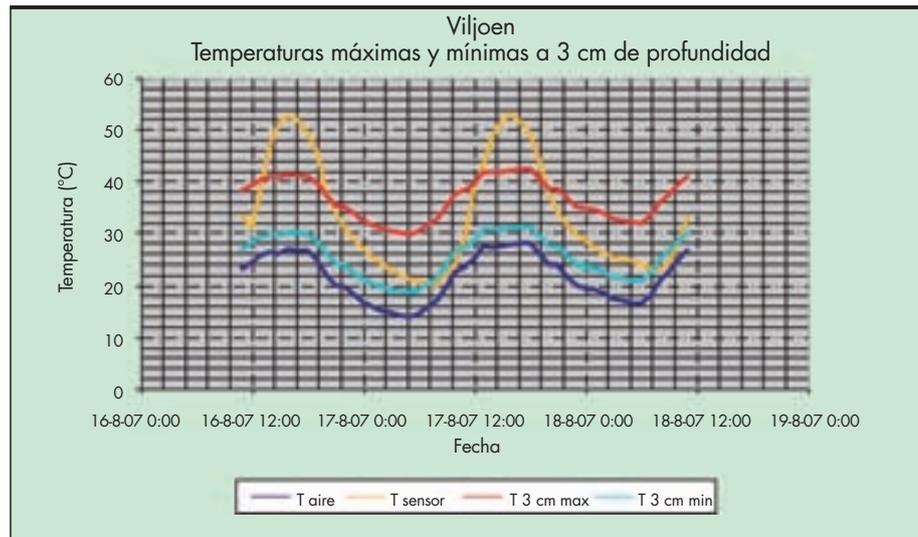


FIGURA 6. Temperaturas extremas a 3 cm con Viljoen.

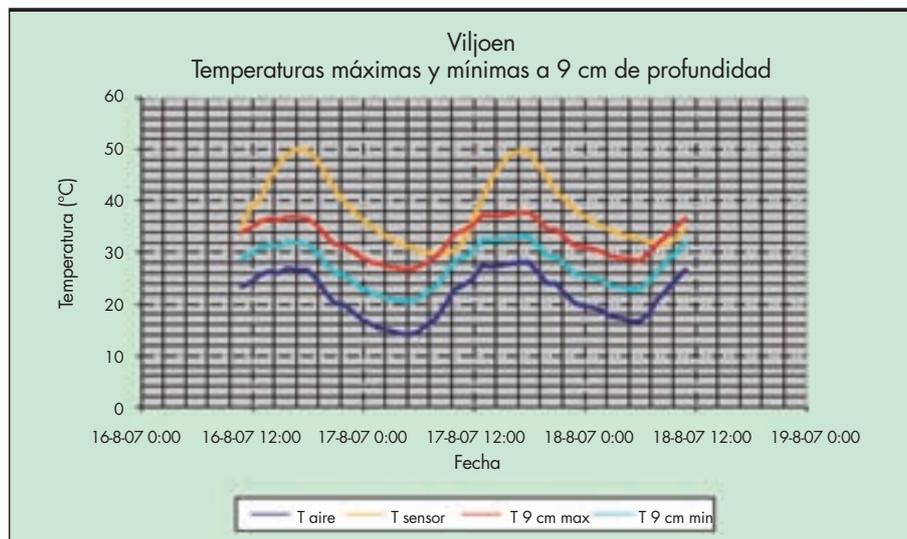


FIGURA 7. Temperaturas extremas a 9 cm con Viljoen.

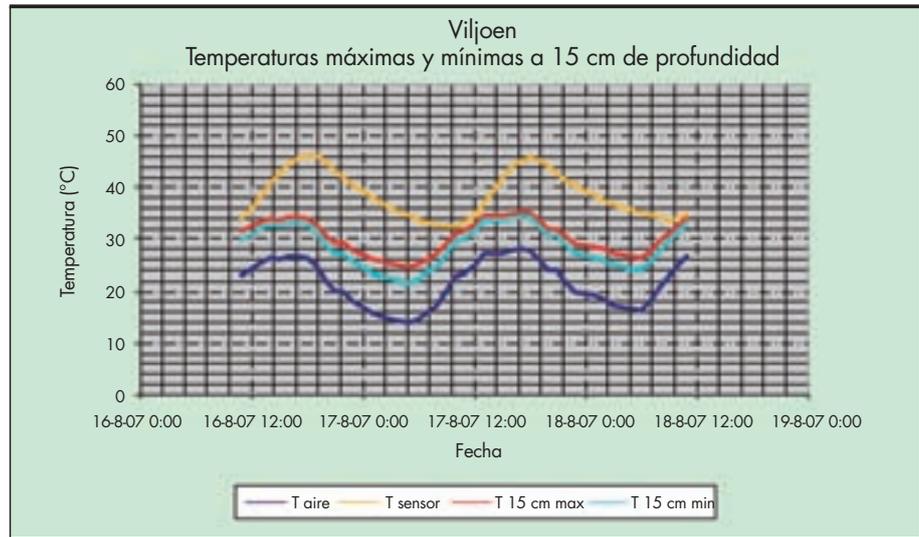


FIGURA 8. Temperaturas extremas a 15 cm con Viljoen.

Temperaturas Máximas (°C)			
Fecha	Profundidad sensor	$T_{\text{sensor}} - T_{\text{Superpave}}$	$T_{\text{sensor}} - T_{\text{Viljoen}}$
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	$T_{\text{sensor}} - T_{\text{Superpave}}$	$T_{\text{sensor}} - T_{\text{Viljoen}}$
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	Coefficientes	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:

$$T_s = A \cdot T_{amb} + B \cdot R_g + C \quad (20)$$

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:

$$T_s = 7,13 \cdot 10^{-1} \cdot T_{amb} - 5,95 \cdot 10^{-3} \cdot R_g + 2,19 \quad (21)$$

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.

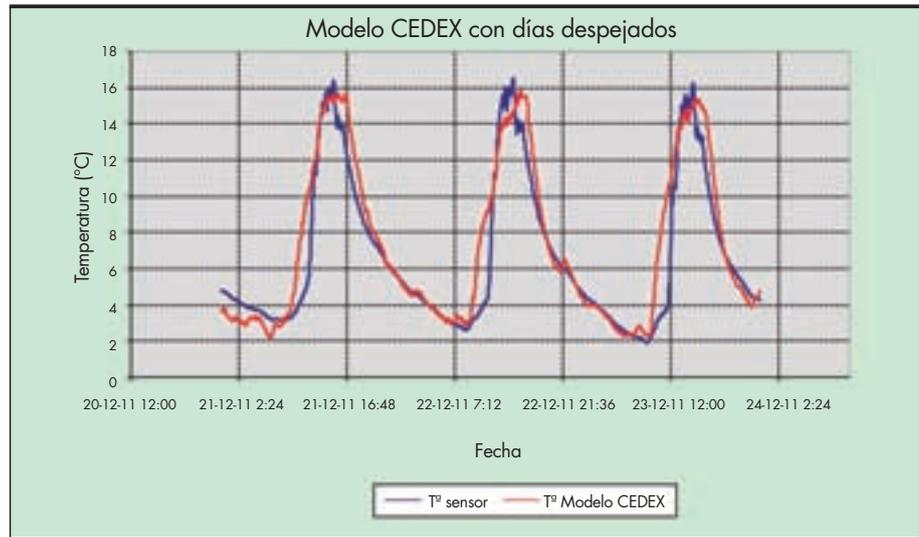


FIGURA 9. Modelo probabilístico desarrollado para días despejados.

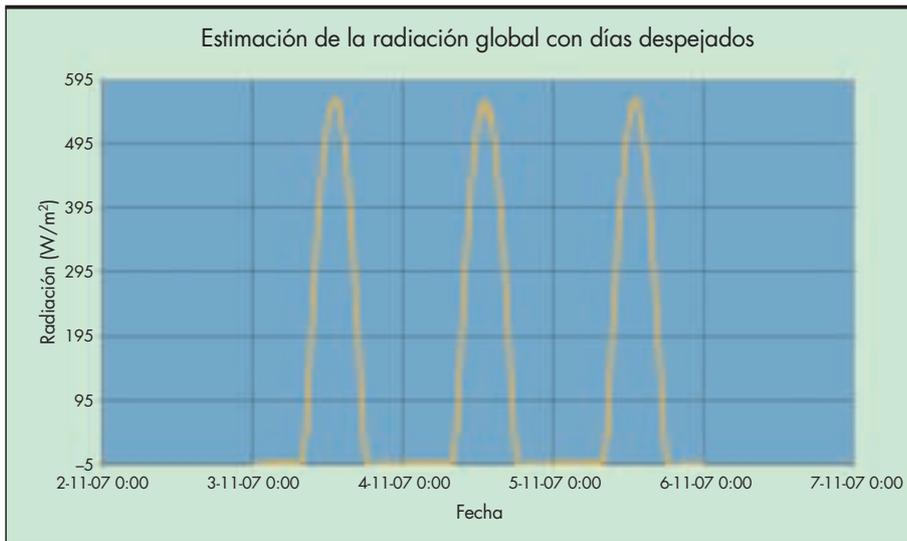


FIGURA 10. Radiación medida por el piranómetro en días despejados.

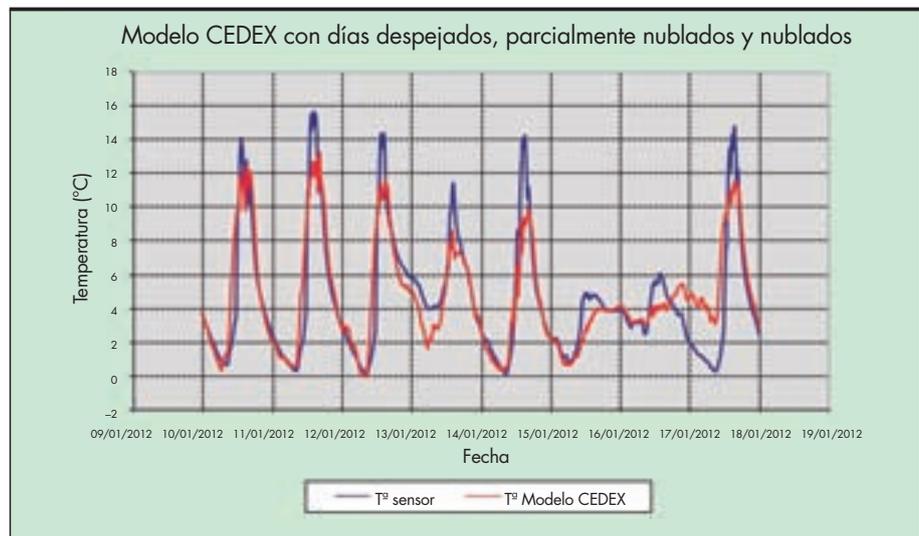


FIGURA 11. Modelo probabilístico desarrollado para diferentes condiciones del cielo.

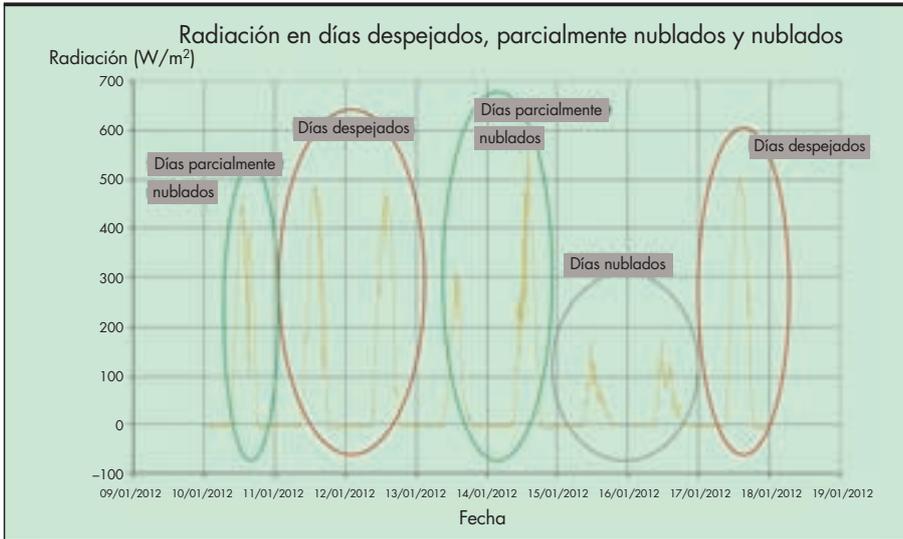


FIGURA 12. Radiación medida por el piranómetro para diferentes condiciones del cielo.

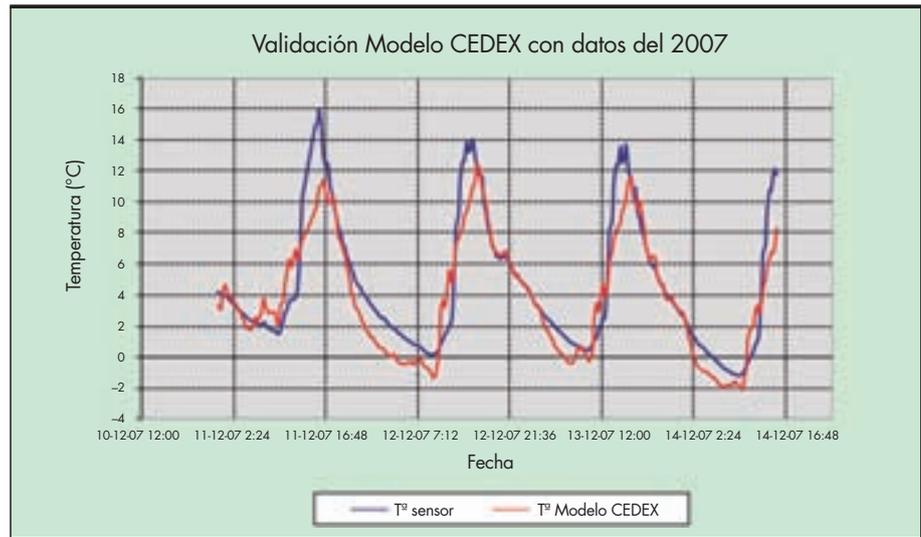


FIGURA 13. Validación del modelo con datos de diciembre de 2007.

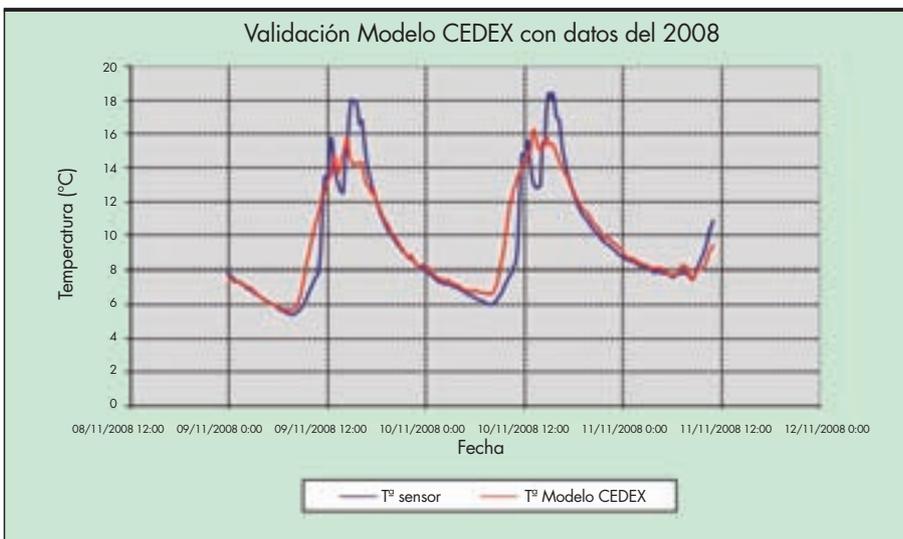


FIGURA 14. Validación del modelo con datos de noviembre de 2008.

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 mode-

los 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: $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ (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:

$$I_0 = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos\theta_z \quad (22)$$

Donde θ_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-

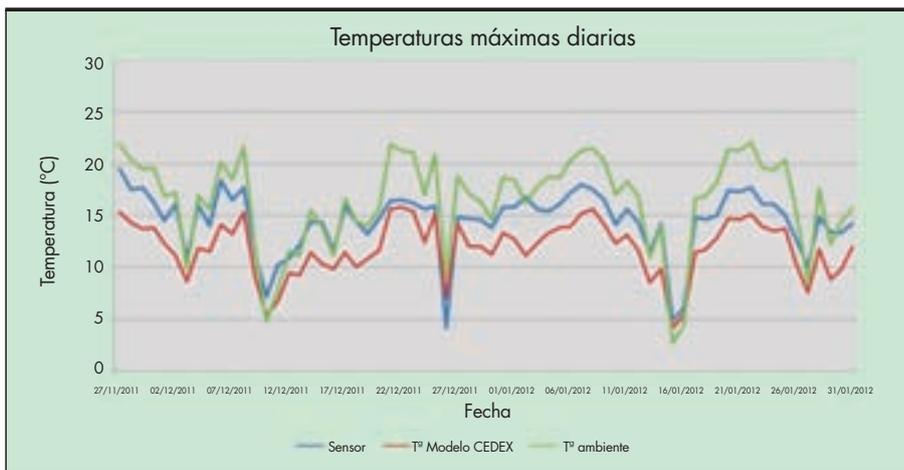


FIGURA 15. Temperaturas máximas diarias predichas por el modelo desarrollado.

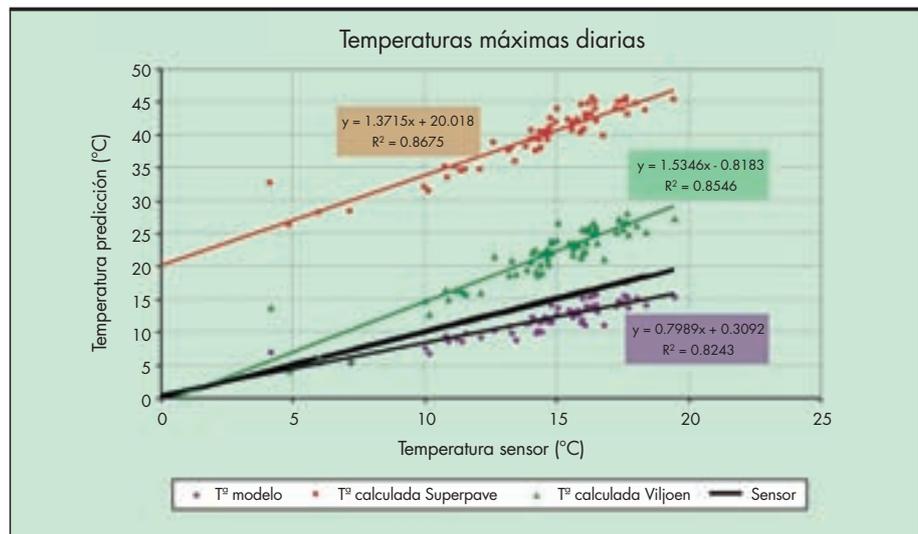


FIGURA 16. Comparación entre métodos para las temperaturas máximas diarias.

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 (ϕ), la declinación (δ) y el ángulo horario (ω), 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:

$$\cos\theta_z = \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (24)$$

El ángulo horario (ω) 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 $\omega=0^\circ$. 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:

$$TSV = TO - AO + \frac{(\lambda - \lambda_s)}{15} + E_t - 12$$

$$E_t = \frac{229,2}{60} \cdot \left[0,000075 + 0,001868 \cdot \cos(\Gamma) - 0,032077 \cdot \text{sen}(\Gamma) \right] - \left[-0,014615 \cdot \cos(2 \cdot \Gamma) - 0,04089 \cdot \text{sen}(2 \cdot \Gamma) \right] \quad (26)$$

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot (n - 1)}{365}$$

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). λ y λ_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 (θ_z), de la altura sobre el nivel del mar (A) y del tipo de clima, obteniendo la expresión:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{k}{\cos\theta_z}} \quad (27)$$

Donde a_0 , a_1 y k son parámetros ajustados empíricamente que resultan en las siguientes ecuaciones:

$$a_0 = r_0 \cdot \left[0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - A)^2 \right]$$

$$a_1 = r_1 \cdot \left[0,5055 + 0,00595 \cdot (6,5 - A)^2 \right] \quad (28)$$

$$k = r_k \cdot \left[0,2711 + 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2 \right]$$

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 sí 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.

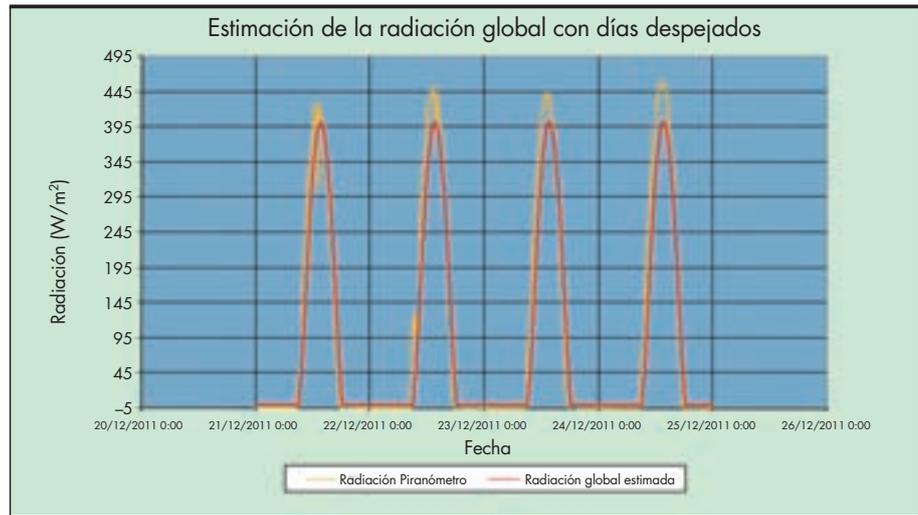


FIGURA 17. Estimación de la radiación global con días despejados.

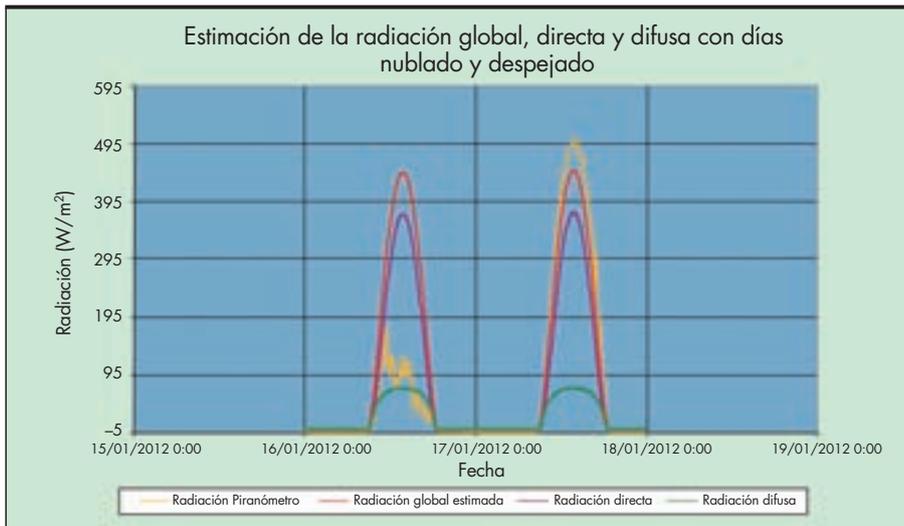


FIGURA 18. Estimación de la radiación incidente con día nublado y despejado.

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 Hermans-

son (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 sobrestiman 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 Witezak". 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., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Von Quintis, H., Moulthrop, 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., Pughl, 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 las 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.

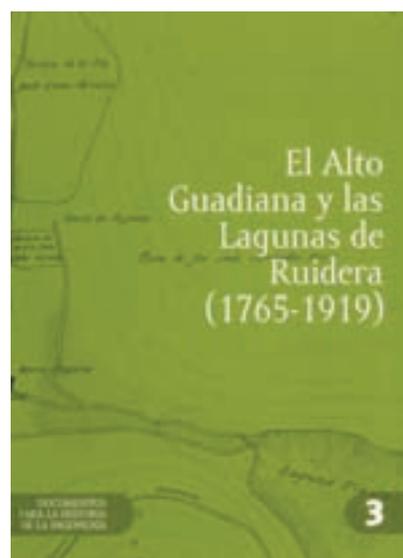
Nº de páginas: 48
Año de edición: 2007
P.V.P.: 10€



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.



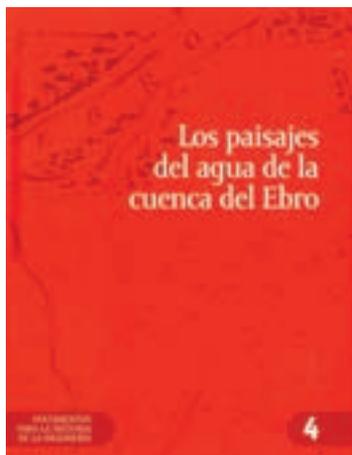
Nº de páginas: 48
Año de edición: 2008
P.V.P.: 10€

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€

visualizan una selección de la documentación gráfica inventariada.

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 vi-

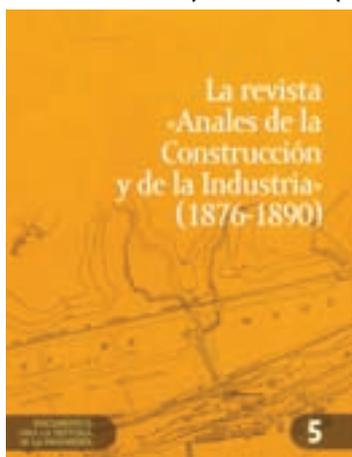
INFRAESTRUCTURAS Y APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS EN CANTABRIA



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 Pisuena. 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)

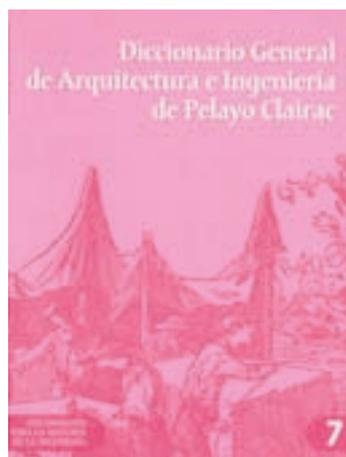


Nº de páginas: 47
Año de edición: 2009
Edición: Ministerio de Fomento,
Centro de Publicaciones
P.V.P.: 10€

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.

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

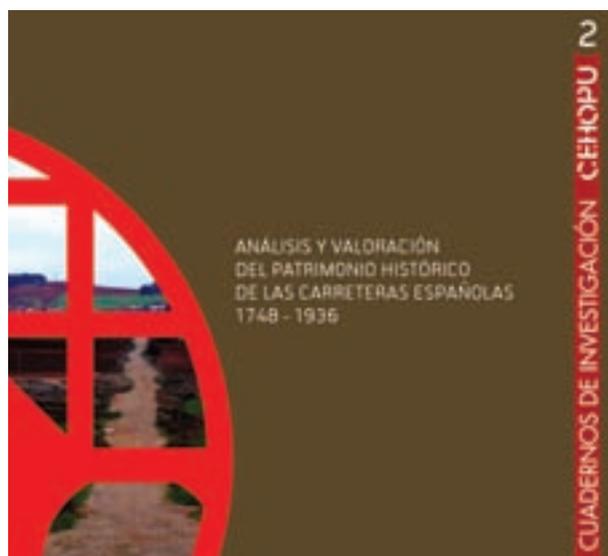


Nº de páginas: 70
Año de edición: 2007
P.V.P.: 10€

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.

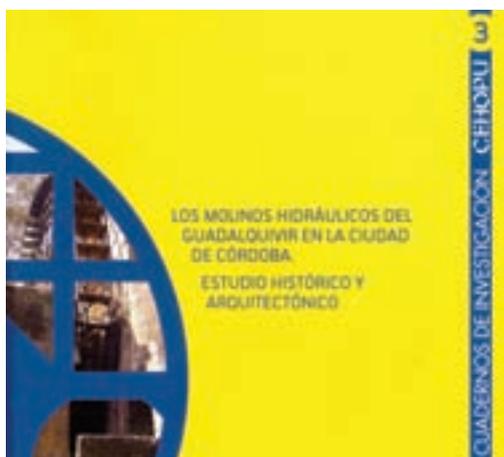


Nº de páginas: 80
Año de edición: 2007
P.V.P.: 10€

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€