

Determinación de la difusividad térmica del subsuelo mediante medidas de temperaturas.

Autor 1^[*] (Sandra García Arias), Autor 2^[**] (D. Miguel Ángel Rey Ronco; Dña. Teresa Alonso Sánchez)

[*] Alumno; [**] Tutor(es)

UO182644@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo será calcular la difusividad térmica del terreno siguiendo el modelo de transmisión de calor a través de la superficie con un flujo periódico perpendicular a ella.

Se realiza en base a un experimento que conlleva la realización de un sondeo de 2 m de profundidad en el Campus de Mieres donde se introducirá una cadena de sensores que registrarán las temperaturas a distintas profundidades del sondeo. Se ha diseñado un equipo de registro de datos de temperaturas adaptado a este experimento, de modo, que los datos son almacenados en una tarjeta micro SD y volcados posteriormente en un PC para su análisis.

Una vez que han sido recogidos los datos, se comienza a procesarlos a través de Matlab realizando diversos ajustes hasta conseguir unos resultados aceptables.

ABSTRACT

The objective of this work is to calculate the thermal diffusivity of the ground following the model of heat transfer through the surface with a periodic flow perpendicular to it.

Is done based on an experiment that involves carrying a survey of 2 m depth in Mieres Campus where a string of sensors to record temperatures at different depths of the survey will be entered. We have designed a computer registry database of

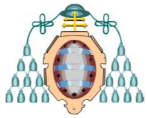
temperatures suitable for this experiment, so that the data is stored on a micro SD and then dumps on a PC for analysis card.

Once the data have been collected, it starts processing them through Matlab making various adjustments to achieve acceptable results.

1 ANTECEDENTES

El método para determinar la difusividad térmica del terreno, se basa en el estudio de las variaciones de las temperaturas en el suelo, debido a las oscilaciones de la misma en el exterior. Se puede considerar que la temperatura ambiente oscila diaria y estacionalmente, y eso implica un flujo de calor desde el terreno perpendicular hacia el mismo. Si se estudian las variaciones de temperatura se puede determinar la difusividad térmica del terreno, hecho que ha sido estudiado por varios autores, entre los que destacan [4] y [6].

Según [4] hace una estimación de la difusividad térmica mediante la comparación de los datos de temperatura medidos en diferentes pozos con la ecuación de calor. Tras un estudio exhaustivo de conjuntos de datos de temperatura superficial y subterránea, presentan un modelo numérico que pretende estimar la variación estacional del flujo de agua vertical, así como la difusividad térmica utilizando los datos de temperatura. Este modelo, en comparación con el modelo de conducción de calor convencional, puede dilucidar los procesos



hidrotérmicos que ocurren en la zona con una mejor precisión.

Por otra parte, [6] hace una evaluación de algoritmos de difusividad térmica mediante comparación entre los datos recopilados de dos sitios ecuatoriales.

Además de esto investiga los efectos de las variaciones transitorias en la humedad del suelo, siendo el objeto principal la obtención de una representación precisa de la dinámica térmica mediante la investigación de los efectos de las variaciones estacionales por el contenido de la humedad en el suelo, comprobando que la difusividad térmica tiene una tendencia creciente con el aumento de la humedad, todos los índices estadísticos utilizados muestran que la heterogeneidad inducida por la precipitación afecta a la precisión de todos estos algoritmos.

Otro de los métodos importante que cabe destacar es el de la relación de la amplitud a partir de la tasa de cambio de temperatura media en cada nivel de la sonda utilizado por [7] para un estudio de estimación de propiedades térmicas del suelo a partir de la temperatura.

Centrándonos en nuestro estudio, con una serie de ecuaciones obtenidas a partir de la ecuación de Fourier y las condiciones de contorno que se detallan posteriormente, se puede calcular la penetración de las ondas periódicas de temperatura en la Tierra. Esto es muy interesante por la conexión que existe entre la variación de temperaturas diarias y anuales a distintas profundidades; y la velocidad de penetración de dichas ondas, y por tanto el momento en el que el máximo y mínimo se espera que ocurran a distintas profundidades.

La superficie del suelo varía su temperatura diariamente dentro de la temporada en la que se encuentre. A partir de la ecuación de Fourier y teniendo en cuenta la condición de contorno caracterizada por un armónico se pueden obtener las variaciones producidas a distintas profundidades. También es posible calcular donde se alcanza la temperatura de congelación bajo unas determinadas condiciones. Esto también es estudiado por [4] presenta en el modelo comentado anteriormente las perturbaciones de transferencia

de calor debidos a los efectos del calor latente asociado con la congelación y descongelación del agua en el suelo.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

El método para determinar la difusividad térmica del terreno, se basa en las variaciones de las temperaturas en el suelo, debido a las oscilaciones de temperatura en el exterior. Considerando que la temperatura ambiente oscila de forma diaria y estacional, estudiando las variaciones de temperatura podemos determinar la difusividad del terreno.

El calor se puede transferir de forma básica de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee mayor temperatura hacia uno que posee la temperatura más baja, es decir el terreno es un sistema multifase con un complejo mecanismo de intercambio de calor, compuesto por diferentes procesos de transmisión.

La transferencia de calor presente en el terreno, ocurre principalmente por conducción y en segundo lugar por convección. Tomando como modelo de estudio un terreno en el que se desprecia la presencia de agua y gas, podemos centrarnos únicamente en la transferencia de calor por medio de conducción térmica.

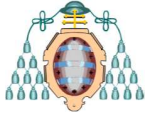
La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier, que establece que el flujo de transferencia de calor por conducción en un medio isótropo es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección. De forma vectorial:

$$q = -k\nabla T$$

Dónde:

q = vector flujo de calor por unidad de superficie

k = cte de proporcionalidad, conductividad térmica



$\nabla T =$ *gradiente campo de temperatura en el interior*

De forma integral, el calor que atraviesa una superficie S por unidad de tiempo viene dado por la expresión:

$$\frac{dQ_s}{dt} = \int_S q \cdot dS = -k \int_S \nabla T \cdot dS$$

Teniendo en cuenta el caso más general de la ecuación de conducción, expresada en forma diferencial y despreciando el calor almacenado en el material. Se obtiene la siguiente ecuación:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \text{difusividad térmica } \left(\frac{m^2}{s} \right)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \text{laplaciano del campo temperatura}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{variación de temperatura con el tiempo}$$

Si interponemos las condiciones de contorno caracterizada por un armónico, el primer caso de análisis es el convencional, que ha sido demostrado por Ingersoll et al, 1954 y se trata de aquel cuya condición de contorno es una función periódica representada:

$$T_0 = T_m + A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Siendo

- T_m la temperatura ambiente media (°C)
- A_0 la amplitud máxima de la condición de contorno (°C)
- ω frecuencia angular de la variación periódica (rad/s)
- t tiempo (s)

La temperatura tiene dos tipos de oscilaciones: por una parte la oscilación diaria y por otro lado la oscilación estacional. En cada caso la frecuencia angular es diferente: en el primer caso corresponde a un Periodo de 86400 s, y en el segundo a un periodo de 3153600s. Según el tipo de estudio que se realice, se tendrá que considerar un periodo u otro.

Teniendo en cuenta que en la profundidad x, la amplitud máxima de la onda sinusoidal de la temperatura es $A_0 \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}}}$, que se puede expresar en función del periodo P, pudiendo relacionarlo con ω a través de $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{P}$ y siendo T_m la temperatura ambiente media, se obtiene la siguiente ecuación:

$$T(x, t) - T_m = A_0 \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{P \cdot \alpha}}} \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{P} \cdot t - x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{P \cdot \alpha}} \right)$$

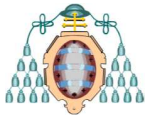
Esta ecuación relaciona la temperatura del terreno a distintas profundidades y en cualquier momento con parámetros de la ecuación de contorno y del terreno. Al medir los valores de $T^a(x, t)$ y una vez conocidos los parámetros de la ecuación de contorno se puede determinar la difusividad.

3 MÉTODO DE TRABAJO

Se propone realizar un dispositivo para la determinación de la difusividad térmica del terreno en el Campus de Mieres empleando el modelo teórico anteriormente explicado.

El experimento consiste en realizar un sondeo de 2 metros de profundidad en las inmediaciones del Campus de Mieres. Para realizar el sondeo se utiliza una barrena de 2,5 metros que es introducida por golpeo en el terreno.

Previamente, se ha diseñado y construido un equipo autónomo de medida de la temperatura consistente en una serie de sensores de temperatura del tipo DS18S20 colocados en diferentes posiciones a la largo de una cadena. Cada sensor del conjunto se conecta a tres cables eléctricos a modo de *bus* (uno de tensión, uno de masa y uno de señal). La cadena de 20 sensores se



introduce en un tubo de protección sellado y relleno con aceite aislante, para protegerle de la posible entrada de agua del sondeo.

tarjeta SD. Posteriormente se requiere importar estos datos a un archivo de *Excel* para su análisis.



Figura 1. Montaje de sensores.

En la figura siguiente se muestra un esquema de la disposición de los sensores.

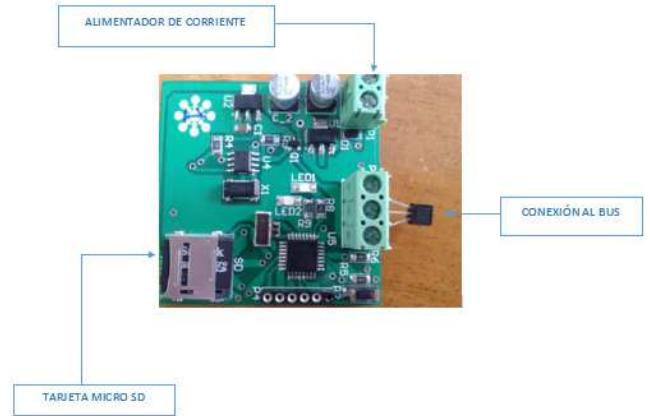


Figura 3. Detalle montaje

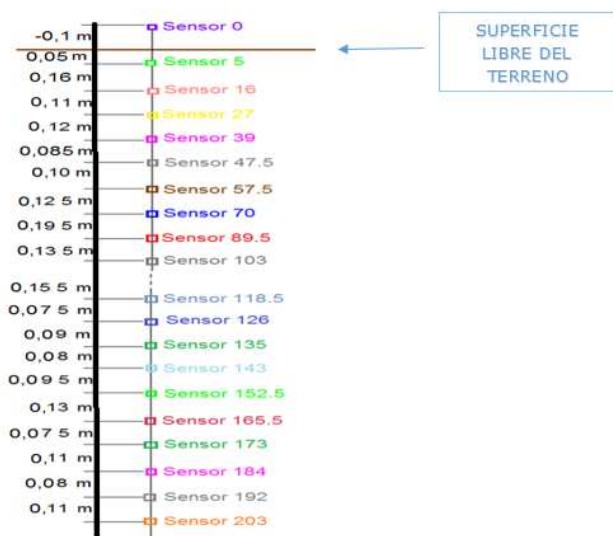


Figura 2. Posición de los sensores

La cadena de sensores se une a una tarjeta de adquisición de datos que almacena las medidas realizadas cada 300 s.

Después de introducir el tubo con la cadena de sensores en el sondeo y se rellena el hueco con una lechada de anhídrita para asegurar una buena conductividad térmica entre el terreno y el tubo de la cadena de sensores. Finalmente se conecta la tarjeta y cada semana se extrae la tarjeta micro SD para descargar los datos y se vuelve a colocar.

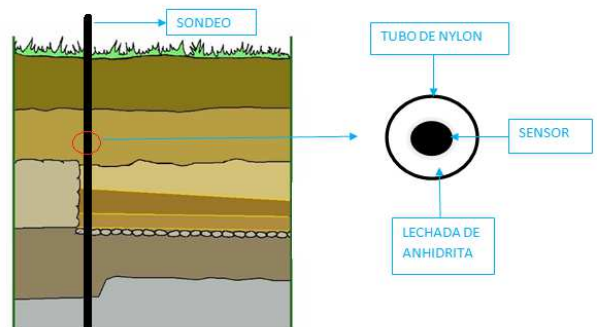
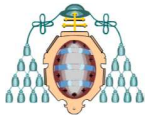


Figura 5. Detalle de sondeo

El registrador recoge los datos procedentes de los sensores y los almacena en un archivo *.txt* en una



4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de temperatura recogidos por la tarjeta desde el día 10 de Abril a las 13:08 hasta el día 7 de Mayo a las 7:38 se colocan de forma ordenada en una hoja Excel. En el anexo I se muestran los datos obtenidos desde el 10 de Abril a las 13:08 hasta el 10 de Abril a las 14:23, que siguen el formato que se indica a continuación:

DÍA↓	HORA↓	HORA (s) ↓	↓DENOMINACIÓN DEL SENSOR↓		
			0,39	0,475	0,575
14-abr	0:27:00	300000	-0,07150	-0,13270	-0,07040
14-abr	0:32:00	300300	-0,07294	-0,13408	-0,07165
14-abr	0:37:00	300600	-0,01438	-0,06547	-0,07290
14-abr	0:42:00	300900	-0,07582	-0,13685	-0,07415
14-abr	0:47:00	301200	-0,07727	-0,06823	-0,07540

Figura 6. Extracto de datos

Como los datos recogidos corresponden a un mes esperamos visualizar las variaciones necesarias entre el día y la noche y por lo tanto, el periodo es de 86400s.

Las regresiones se han realizado a través del programa Matlab.

4.1 Regresión de la ecuación de contorno T_0 .

Corresponde con la regresión de las temperaturas ambientales con la ecuación:

$$T_0 = T_m + A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Para este se hace una ajuste con las condiciones de contorno de partida y sustituyendo las variables de profundidad y tiempo correspondiente a los datos del sensor que utilizamos. Mediante Matlab se representa los datos de temperatura del sensor y posteriormente se ajusta a la condición de contorno de partida.

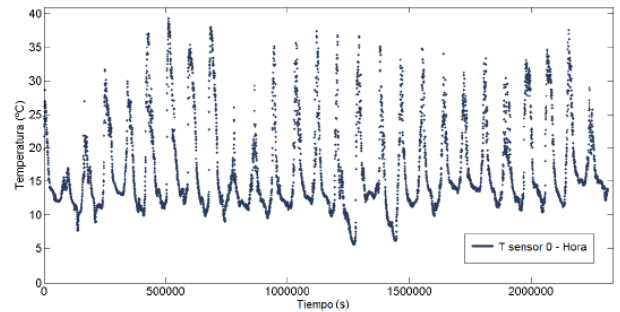


Figura 7. Representación de datos de temperatura del Sensor 0

Los resultados obtenidos del ajuste son los siguientes: (entre paréntesis se muestra el intervalo para un nivel de confianza del 95%, y R^2 es el coeficiente de correlación)

- $A_0 = 8$ (7,858; 8,142) °C
- $T_m = 16,64$ (16,54; 16,74)°C
- $\alpha = 1,505$ (1,487; 1,523)
- $R^2 = 0,5394$

Podemos destacar, en relación a los resultados obtenidos, que el ajuste realizado tiene un coeficiente de correlación bajo, lo cual es normal puesto que el modelo sinusoidal solo responde a la tendencia general y no a las condiciones climatológicas puntuales.

En la siguiente figura se muestra como se ajustan los datos a la condición de contorno de partida en Matlab.

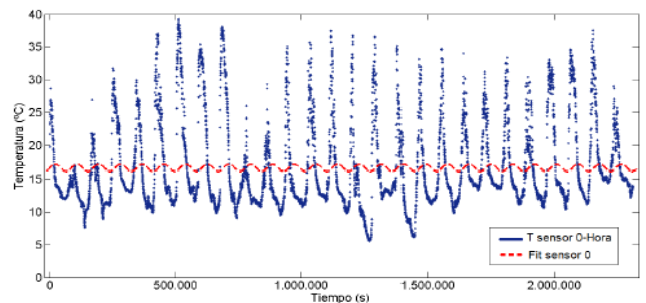
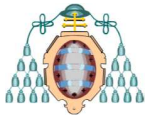


Figura 7. Sensor 0-fit



4.2 Regresión de T(x, t)

Para sensores por debajo de la superficie del terreno, el ajuste se ha realizado con la ecuación:

$$T = T_m + A_0 \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{86400}}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{P} - x \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{P}}\right)$$

En función de la ubicación del mismo, la ecuación de ajuste varía. A modo de ejemplo se muestran los datos obtenidos para el sensor 0.05, y la regresión realizada.

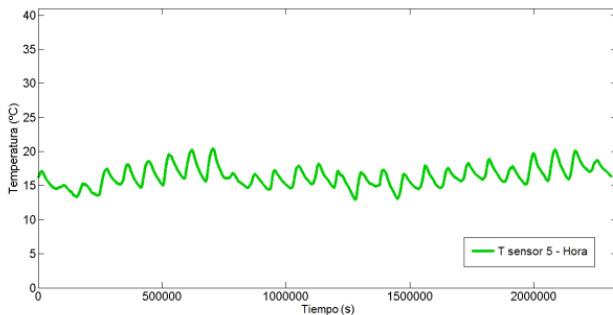


Figura 8. Sensor 0.05.

A continuación se ajusta a la condición de contorno obteniendo los siguientes parámetros con un intervalo de confianza del 95%. Los resultados que se obtienen son:

- $A_0 = 1,2220$ (1,1680; 1,2770) °C
- $T_m = 16,37$ (16,34; 16,39) °C
- $\alpha = 1,9990$ (-0,02083; 0,02103) m²/s
- $R^2 = 0,3343$

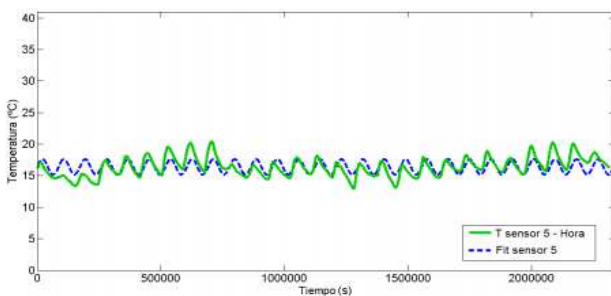


Figura 9. Sensor 0.05-fit

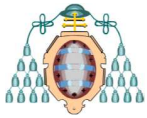
Se observa en la figura anterior como se ajustan los datos a la condición de contorno, percibiendo que el ajuste es notablemente mejor en ciertas zonas, como por ejemplo, entre 300000 y 780000 segundos.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para los demás sensores.

SENSOR	A_0 (°C)	T_m (°C)	α (m ² /s)	R^2
0,16	0,9929	16,25	$5,26 \cdot 10^{-6}$	0,187
0,27	1,117	16,1	$2,62 \cdot 10^{-6}$	0,098
0,39	$4,05 \cdot 10^{-3}$	15,72	$5,04 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$
0,475	1,489	15,32	$1,118 \cdot 10^{-6}$	0,0103
0,575	$6,91 \cdot 10^{-3}$	15,05	$3,57 \cdot 10^{-6}$	$3,73 \cdot 10^{-5}$
0,7	0,4745	14,68	$2,04 \cdot 10^{-6}$	$5,86 \cdot 10^{-4}$
0,895	0,5903	14,18	$5,15 \cdot 10^{-6}$	$5,39 \cdot 10^{-4}$
1,03	0,3419	13,92	$5,72 \cdot 10^{-6}$	$6,26 \cdot 10^{-4}$
1,185	0,2878	16,65	$7,34 \cdot 10^{-6}$	$4,30 \cdot 10^{-4}$
1,26	0,05786	13,48	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-4}$
1,35	0,3076	13,29	$8,90 \cdot 10^{-6}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$
1,43	0,2758	13,2	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$6,01 \cdot 10^{-4}$
1,525	0,1948	13,17	$1,43 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-4}$
1,655	$5,858 \cdot 10^{-4}$	13,08	$4,15 \cdot 10^{-5}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$
1,73	0,1804	13,06	$1,64 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-4}$
1,84	0,01542	13,02	0,996	$4,05 \cdot 10^{-5}$
1,92	0,4467	12,92	$3,51 \cdot 10^{-5}$	$3,77 \cdot 10^{-4}$
2,03	$9,61 \cdot 10^{-2}$	12,87	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$2,26 \cdot 10^{-4}$

Observando los datos anteriores se puede afirmar, en general:

- En todos los casos, la difusividad es coherente con los valores esperados ($\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6}$ m²/s).
- Los coeficientes de correlación indican la necesidad de introducir más parámetros caracterizadores de la evolución.
- A partir del sensor 8 las medidas de temperatura se aproximan a una recta perdiendo el carácter sinusoidal.



4.2.1 Eliminación de la tendencia lineal.

Con objeto de mejorar el modelo se analizan, de forma más detenida, los datos obtenidos. En la siguiente figura se muestra un extracto de los registros de todos los sensores, se adjunta en anexos el gráfico completo.

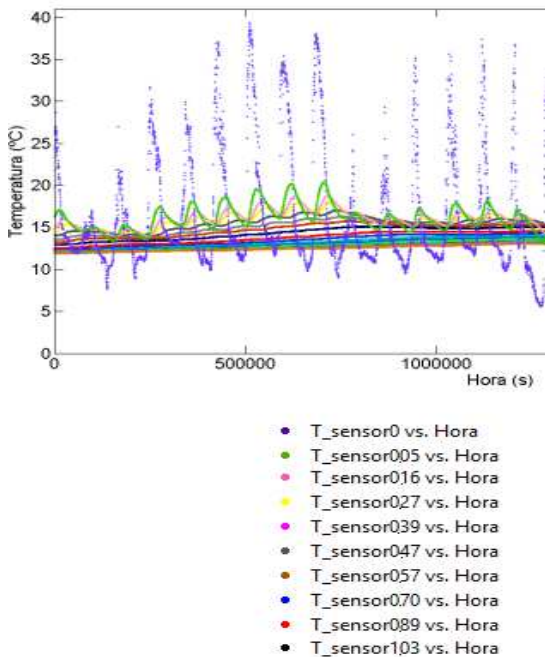


Figura 10. Extracto de datos de todos los sensores

En la figura anterior se observa, que hay una cierta tendencia lineal creciente de los datos, lo que se repite en cada uno de los sensores. En el siguiente paso, se elimina esta tendencia lineal.

Para ello se escoge un intervalo de tiempo en el que las condiciones climatológicas sean estables y se ajustan los datos de temperatura a una función lineal $f(x) = p_1 \cdot x + p_2$. Se determinan los parámetros p_1 y p_2 y finalmente se ajustaran los datos iniciales de temperatura a la función sinusoidal menos la tendencia lineal. Es decir, a la ecuación

$$T = T_m + A_0 \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{P}}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{P} - x \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{P}}\right) - f(x)$$

A continuación se exponen los resultados de este tratamiento matemático.

Se observa que las temperaturas se ajustan a la condición de contorno relativamente bien, en el rango de 300000 y 780000 segundos, y en este espacio de tiempo, en el cual las condiciones climatológicas son muy similares.

Por ello, se realiza una regla de exclusión en Matlab considerando las temperaturas en el periodo de tiempo comprendido entre 300000 y 780000s resultando la figura siguiente.

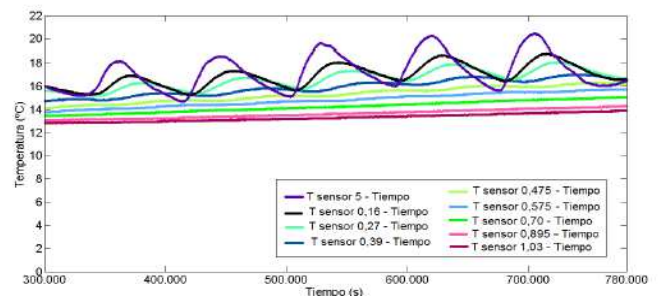


Figura 11. Sensores en el rango 300000-780000

Se realiza un ajuste lineal a cada conjunto de datos con Matlab y en la figura siguiente se muestran las rectas de tendencia lineal de cada grupo de datos.

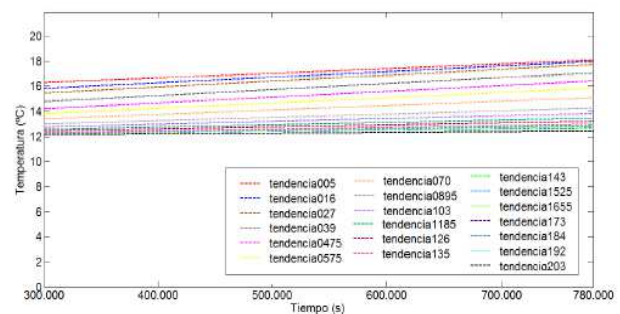
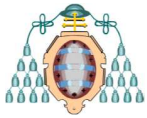


Figura 12. Tendencias

En la tabla siguiente se recogen los valores de los dos coeficientes buscados.

SENSOR	p_1	p_2
0,05	$4,46 \cdot 10^{-6}$	14,48



SENSOR	p_1	p_2
0,16	$4,733 \cdot 10^{-6}$	14,03
0,27	$4,805 \cdot 10^{-6}$	13,32
0,39	$4,609 \cdot 10^{-6}$	12,81
0,475	$4,168 \cdot 10^{-6}$	12,57
0,575	$3,449 \cdot 10^{-6}$	12,38
0,7	$2,618 \cdot 10^{-6}$	12,21
0,895	$2,253 \cdot 10^{-6}$	12,06
1,03	$4,168 \cdot 10^{-6}$	12,57
1,185	$1,84 \cdot 10^{-6}$	12,38
1,26	$1,61 \cdot 10^{-6}$	12,21
1,35	$1,39 \cdot 10^{-6}$	12,03
1,43	$1,32 \cdot 10^{-6}$	12,01
1,525	$1,17 \cdot 10^{-6}$	11,96
1,655	$1,09 \cdot 10^{-6}$	11,9
1,73	$9,40 \cdot 10^{-7}$	12
1,84	$1,03 \cdot 10^{-6}$	11,91
1,92	$7,98 \cdot 10^{-7}$	12,02
2,03	$6,16 \cdot 10^{-7}$	11,95

Tabla 1. Coeficientes p_1 y p_2

Finalmente con los parámetros p_1 y p_2 obtenidos tenemos que realizar un ajuste sinusoidal eliminando la tendencia lineal a la que tienden el conjunto de sensores estudiados.

Se muestran en la figura siguiente los valores calculados correspondientes al sensor 0,05.

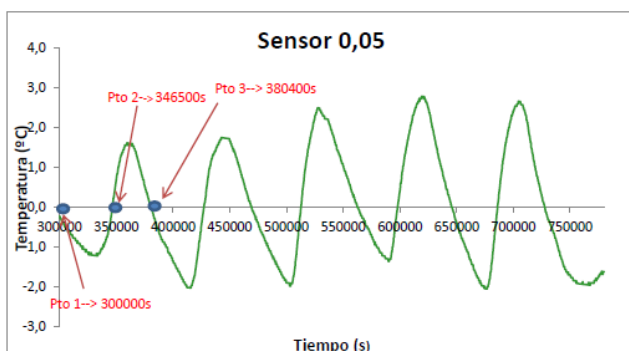


Figura 13. Datos sin tendencia lineal del sensor 0,05

Observando esta representación vemos claramente unas oscilaciones que intuyen que son debidas al día y la noche. Entre el punto 1 y 2 hay 46500 segundos de diferencia, que en horas son aproximadamente 12.9 horas y entre los puntos 2 y 3 hay 33900 segundos de diferencia, que en horas son 9.4 horas.

A continuación se muestra matemáticamente lo que se ha podido observar de forma gráfica, es decir, los datos se aproximan a una sinusoidal del periodo 86400s. Para ello, se usa la función:

$$T = A_0 \cdot \text{sen} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{w} + \phi \right)$$

Siendo:

- ϕ desfase horario

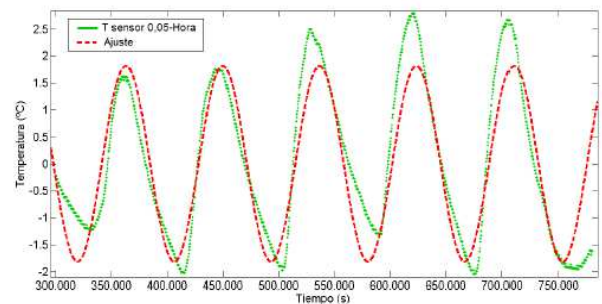
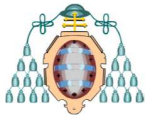


Figura 14. Ajuste sinusoidal sensor 0,05

Los datos obtenidos con una bondad de ajuste del 95% son los siguientes:

- $A_0 = 1,814$ (1,773; 1,855)
- $P = 86810$ (86610; 87000)
- $\phi = 6,718$ (6,627; 6,808)
- $R^2 = 0,825$

Se observa que el coeficiente de correlación es elevado, y que el periodo es aproximadamente 86400s (tiempo en segundos del día). La aproximación del periodo a 86400s indica que el sensor es capaz de diferenciar las oscilaciones entre el día y la noche a esta profundidad.



Así se procede con todos los sensores, obteniendo los siguientes datos:

SENSOR	$A_0(^{\circ}\text{C})$	(s)	Φ	R^2
0,05	1,874	86810	6,718	0,825
0,16	0,937	86540	5,866	0,856
0,27	-0,574	86340	8,410	0,847
0,39	-0,212	85630	7,195	0,726
0,475	-0,094	84280	5,729	0,545
0,575	-0,039	85110	5,226	0,361
0,7	0,013	89390	9,246	0,101
0,895	0,011	74180	-0,268	-2,164

Tabla 2. Datos resultantes

Se comprueba que se puede diferenciar entre el día y la noche hasta la profundidad 0.70 donde ya es difícil poder ver claramente esta oscilación.

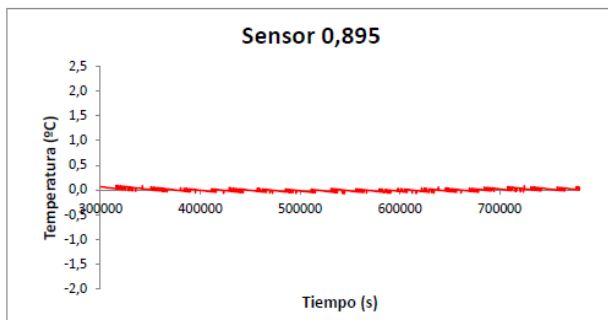


Figura 15. Ajuste sinusoidal sensor 0,895

Esto es debido a que el sensor es de 10 bits, y cada bit puede determinar un $\Delta T \sim 100^{\circ}\text{C}$. En total pueden obtenerse 1024 registros, por lo que la precisión real del sensor es de $100/1024 \sim 0,1 \sim 0,06$, es decir, si se produce una variación de temperatura más pequeña que $0,06^{\circ}\text{C}$ el sensor no es capaz de percibirlo, y como resultado no se perciben fluctuaciones.

Llegados a este punto no tiene sentido que se siga estudiando el ajuste del resto de sensores, puesto que se acaba de comprobar que a partir de una determinada profundidad las oscilaciones son tan pequeñas que los sensores no son capaces de registrarlas.

5 CONCLUSIONES

Se realiza un sondeo para el registro de temperaturas a diferentes profundidades mediante un equipo de medida que consiste en un montaje de una cadena de sensores y una tarjeta de registro, los datos de temperatura obtenidos se aproximan a la ecuación de contorno obteniendo un coeficiente de correlación resultante inferior al esperado.

Se han estudiado las causas por las cuáles los coeficientes de correlación son bajos, y se ha intuido que los datos de temperatura registrados siguen una tendencia lineal ascendente.

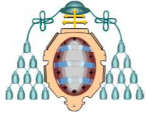
Para acotar el estudio, este trabajo se ha centrado en el análisis del tramo horario entre 300000 y 780000 segundos, al objeto de verificar que existe una tendencia lineal ascendente y posteriormente eliminarla.

Se ha determinado la tendencia lineal ascendente para cada conjunto de datos de temperatura obtenidos por cada sensor, y se ha eliminado la tendencia.

A continuación, se ha realizado un nuevo ajuste de los datos de temperatura con otra condición de contorno. En este ajuste el coeficiente de correlación es bueno y el valor del período de cada sensor es cercano al período de un día excepto para los sensores colocados a una profundidad mayor de 0,7 metros.

Se ha comprobado que a partir de una determinada profundidad ($> 0,7$ metros) no se perciben fluctuaciones entre el día y la noche. Este hecho, es debido a que el sensor es de 10bits, y cada bit puede determinar un $\Delta T \sim 100^{\circ}\text{C}$. En total puede obtenerse 1024 registros, por lo que la precisión real del sensor es de $100/1024 \sim 0,1 \sim 0,06$, es decir, si se produce una variación de temperatura más pequeña que $0,06^{\circ}\text{C}$ el sensor no es capaz de percibirlo, y como resultado no se perciben fluctuaciones.

Tras realizar dicho procesamiento de los datos y observando las carencias que surgieron se puede concluir que para mejorar el experimento habría que tener en cuenta ciertos aspectos como el uso de un convertidor analógico de más de 10 bits que

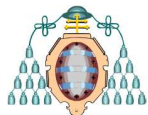


permita detectar menores incrementos de temperatura, menor distancia entre los sensores de la cadena para obtener más datos, mayor duración del experimento para poder comprobar las fluctuaciones estacionales de temperatura así como uso de sensores menos económicos pero que no tengan tanta limitación en la precisión.

Además de esto, sabemos que la tarjeta diseñada para la toma de datos de temperatura debe estar enchufada a la corriente eléctrica. Al objeto de abaratar costes, se puede diseñar una tarjeta que se pueda usar sin necesidad de corriente, mediante una batería convencional.

6 REFERENCIAS

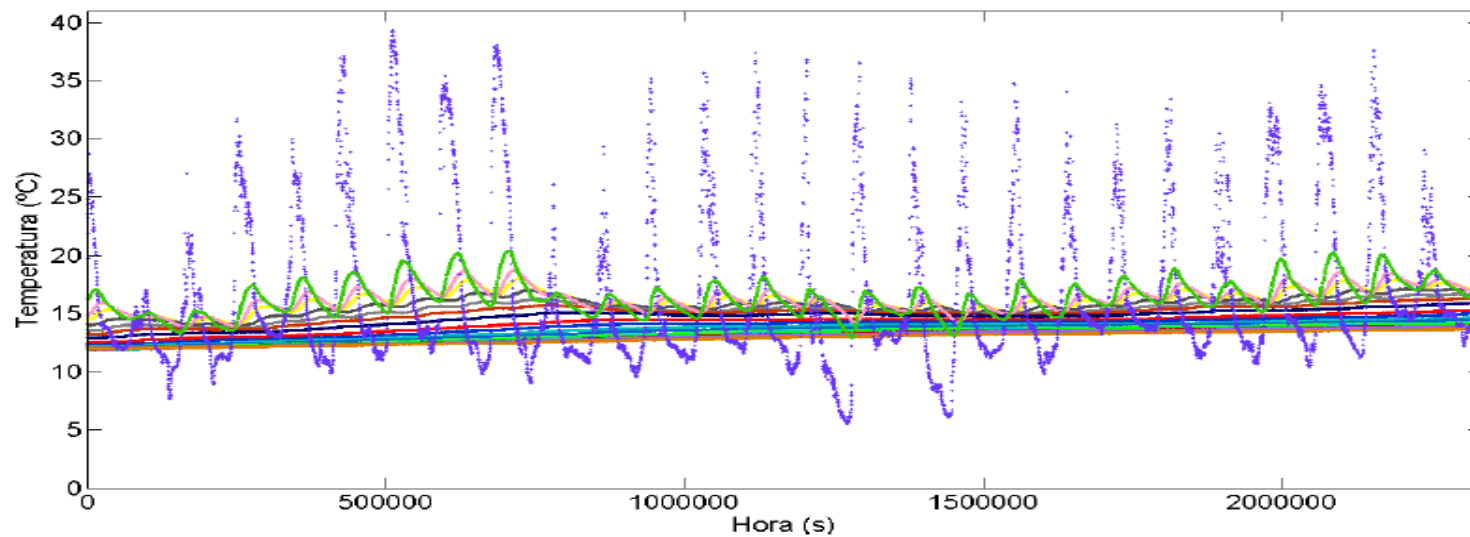
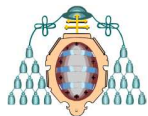
- [1] Beardsmore, G.R. (2012). Towards a shallow heat flow probe for mapping thermal anomalies. Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, 2012 SGP-TR-194.
- [2] Hinkel, K.M. (1997). Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series. Cold Regions Science and Technology, 26(1), 1-15.
- [3] Ingersoll R., L., J. Zobel, O., and C. Ingersoll, A (1954). Heat conduction with engineering, geological and other applications. Wisconsin. The University of Wisconsin Press.
- [4] Koo, M.-H. , Song, Y. (2008). Estimating apparent thermal diffusivity using temperature time series: A comparison of temperature data measured in KMA boreholes and NGMN wells. Geosciences Journal, 12(3), 255-264.
- [5] Putkonen, J. (1998). Soil thermal properties and heat transfer processes near Nykesund, Northwestern Spitsbergen, and Svalbard. Polar Research, 17(2), 165-179.
- [6] Otunla, T.A., Oladiran, E.O. (2013). Evaluation of soil thermal diffusivity algorithms at two equatorial sites in West Africa Annals of Geophysics, 56(1).
- [7] Smerdon, J.E., Pollack, H.N., Enz, J.W., Lewis, M.J. (2003). Conduction-dominated heat transport of the annual temperature signal in soil. Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, 108(9), ETG 8-1 - 8-6.



7 ANEXOS

		DENOMINACIÓN DEL SENSOR↓																			
DÍA↓	HORA↓	0	5	16	27	39	47,5	57,5	70	89,5	103	118,5	126	135	143	152,5	165,5	173	184	192	203
10-abr	13:08:00	19,8	16,3	14,8	14,6	14,1	13,7	13,3	12,9	12,6	12,4	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1
10-abr	13:13:00	21,8	16,3	14,9	14,5	14,1	13,7	13,4	12,9	12,6	12,3	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,1
10-abr	13:18:00	23,2	16,3	14,9	14,5	14,1	13,6	13,4	12,9	12,6	12,3	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,2	12,0
10-abr	13:23:00	23,5	16,3	14,9	14,6	14,1	13,6	13,3	12,9	12,6	12,4	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,0
10-abr	13:28:00	24,8	16,3	14,9	14,5	14,1	13,7	13,4	12,9	12,6	12,3	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,1
10-abr	13:33:00	26,2	16,3	14,9	14,5	14,1	13,6	13,3	12,9	12,5	12,4	12,3	12,2	12,1	11,9	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,0
10-abr	13:38:00	24,4	16,3	14,9	14,5	14,1	13,6	13,3	12,9	12,6	12,3	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,0
10-abr	13:43:00	25,4	16,3	14,9	14,5	14,1	13,6	13,4	12,9	12,6	12,3	12,2	12,1	12,1	11,9	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,1
10-abr	13:48:00	27,0	16,3	14,9	14,5	14,1	13,6	13,4	12,9	12,5	12,3	12,2	12,2	12,0	11,9	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,0
10-abr	13:53:00	28,7	16,4	14,9	14,5	14,1	13,6	13,3	12,9	12,5	12,3	12,2	12,1	12,1	11,9	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,0
10-abr	13:58:00	26,9	16,4	14,9	14,5	14,0	13,6	13,4	12,9	12,5	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,0
10-abr	14:03:00	26,6	16,4	15,0	14,5	14,1	13,6	13,3	12,9	12,5	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,0
10-abr	14:08:00	26,4	16,4	15,0	14,6	14,1	13,6	13,3	12,9	12,6	12,3	12,3	12,1	12,0	11,9	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,0
10-abr	14:13:00	26,4	16,4	15,0	14,6	14,0	13,6	13,3	12,9	12,6	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,1
10-abr	14:18:00	26,6	16,5	15,0	14,6	14,1	13,6	13,3	12,9	12,6	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,0
10-abr	14:23:00	26,5	16,6	15,0	14,6	14,1	13,6	13,3	12,9	12,5	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	12,0	12,0	12,1	12,0	12,1	12,0

Figura 16. Datos de temperatura.



- | | |
|------------------------|--------------------------|
| ● T_sensor0 vs. Hora | ● T_sensor 1,18 vs. Hora |
| ● T_sensor005 vs. Hora | ● T_sensor 126 vs. Hora |
| ● T_sensor016 vs. Hora | ● T_sensor 135 vs. Hora |
| ● T_sensor027 vs. Hora | ● T_sensor 143 vs. Hora |
| ● T_sensor039 vs. Hora | ● T_sensor 152 vs. Hora |
| ● T_sensor047 vs. Hora | ● T_sensor 165 vs. Hora |
| ● T_sensor057 vs. Hora | ● T_sensor 173 vs. Hora |
| ● T_sensor070 vs. Hora | ● T_sensor 184 vs. Hora |
| ● T_sensor089 vs. Hora | ● T_sensor 192 vs. Hora |
| ● T_sensor103 vs. Hora | ● T_sensor 203 vs. Hora |

Figura 17. Datos de todos los sensores