

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



### CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA UNIDAD LEGARIA

# Caracterización térmica de suelos utilizando ondas térmicas.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE: MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

> PRESENTA: ING. GERARDO VERA MEDINA

> DIRECTOR: DR. ERNESTO MARÍN MOARES

México D. F. Enero del 2007



#### INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

#### CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México D.F el día 11 del mes de diciembre del año 2006, el que suscribe *Gerardo Vera Medina* alumno del Programa de *Postgrado en Tecnología Avanzada* con número de registro *A050197*, adscrito a *CICATA-IPN*, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de *Dr. Ernesto Marín Moares* y cede los derechos del trabajo intitulado *Caracterización térmica de suelos utilizando ondas térmicas*, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección *gerardo.vera.medina@hotmail.com*. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

frenudo Vero Meduro

Nombre y firma



#### INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

#### ACTA DE REVISION DE TESIS

siendo las 11:00 horas del día 11 del mes de En la Ciudad de México Diciembre del 2006 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN para examinar la tesis de grado titulada: Caracterización térmica de suelos utilizando ondas térmicas

Presentada por el alumno: Gerardo Medina Vera materno nombre(s) Apellido paterno Con registro: A 5 0 9 0 1

aspirante al grado de: Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACION DE LA TESIS, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

#### LA COMISION REVISORA

Director, de tesis Dr. Ernesto Marín Moares marlalgh Dr. Miguel Angel Aguilar Frutis Dr. José A alderón Arenas LEC Alfredo Cruz Orea Dr. José de Jesús Medel Juárez Dr EL PRESIDENTE DEL COLEGIO DE INVESTIGACIÓN STRUCTA Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora VANZADA

SIP-14

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar y con letras mayusculas al Dr. Ernesto Marín Moares, por su excelente dirección su incondicional dedicación para que poder realizar este trabajo de tesis, su amistad y consejos y sobre todo por su magnífica tolerancia, comprensión y apoyo

Al buen Gustavo, por todo el apoyo, no solo en el proyecto sino como compañero y amigo.

A Ana Leticia Cardona Gómez, por una atención inigualable y no se diga de los buenos y merecidos regaños que recibí, todo eso sin incluir todo su apoyo y consejos.

A todo el grupo de trabajo que conforman el Programa de Tecnología Avanzada: Ing. Armando, C.P. Horacio, Ing. Pablo, Srita. Laura Vega y Andrés; por sus finísimas atenciones, ayuda, consejos y asesoría, así como también por su generosa amistad.

Un sincero agradecimiento a los profesores del CICATA-IPN: Dr. José Antonio Díaz Góngora, Dr. José Antonio Calderón Arenas, Dr. Miguel Ángel Aguilar Frutis, , Dr. José Luís Fernández Muñoz, Dr. Eduardo San Martín, portado su disponibilidad para resolver dudas y comentarios que siempre fueron bien recibidos y tomados en cuenta, por sus correcciones, observaciones, comentarios y consejos durante el desarrollo de la tesis.

A todos a cada uno de mis compañeros del Postgrado, en especial a los maestros Ricardo Abdelarrage, Alex Florido Cuellar, Hernán Javier Herrera, Alejandro Cardona Ricalde, al Ing Gustavo Juarez Gracia y al Profesor Germán Coller, por su excelente apoyo y amistad,

Agradezco, tanto al CONACYT como al programa PIFI-IPN, por el apoyo económico que por medio de sus becas fue otorgado durante el desarrollo del presente trabajo de tesis.

4

Un especial agradecimiento a todo el laboratorio de mecánica de la ESIME-UA, por tan grata e inigualable amistad y TODO el apoyo incondicional que me han ofrecido.

Y claro esta que no se me puede olvidar la familia y amigos, con todo el corazón y con toda el alma les doy las gracias por todo.

# DEDICATORIA.

Con todo el amor y respeto de un hijo agradecido.

Gracias!!!!!



### PÁGINA

| RESUMEN                          | 8  |
|----------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN                     | 9  |
| CAPITULO 1                       |    |
| Transferencia de calor en suelos | 16 |
| CAPITULO 2                       |    |
| Metodología experimental         | 33 |
| CAPITULO 3                       | 00 |
| Resultados y discusión           | 60 |
| CONCLUSIONES                     | 70 |
|                                  | 72 |
| RECOMENDACIONES                  | 73 |

# Resumen.

Se presenta un experimento relacionado con el fenómeno de la conducción del calor en suelos sometidos a una fuente natural periódica en el tiempo, como es el caso de las oscilaciones diarias de su temperatura debidas a diferentes factores. Se diseñó y construyó un dispositivo que permite realizar mediciones automáticas de las variaciones con el tiempo de la temperatura en el aire y a diferentes profundidades por debajo de la superficie del suelo. Estas fueron realizadas utilizando sensores de temperatura de estado sólido LM-35 incorporados en una punta de medición controlada por una computadora personal a través de una interfase diseñada al efecto. Para determinar parámetros característicos del fenómeno estudiado se ajustaron los resultados de las mediciones a la solución ondulatoria de la ecuación de difusión del calor en presencia de fuentes periódicas de calor. A partir de este tipo de mediciones se propusieron y discutieron tres métodos para determinar la difusividad térmica del suelo.

# **Abstract**

We discuss the features of an experiment related to the conduction of heat in soils excited by a natural periodically time dependent source, namely the daily periodical oscillations in their temperature. A measuring device was designed and constructed for automatic measurements of the daily time air temperature variations as well as of the daily time temperature variations at different depths beneath the soil surface. Measurements were performed using LM-35 solid state temperature sensors incorporated into a computer-controlled probe. In order to obtain characteristic parameters governing the physical phenomena involved, the results of our measurements were fitted to a thermal wave like solution of the heat diffusion equation in the presence of periodical heat sources. From these measurements we have proposed and discussed three methods for the determination of soil's thermal diffusivity

# INTRODUCCIÓN.

La utilización del tratamiento ondulatorio del calor data de 1820. Fourier en su obra *La theorie analytique de la chaleur* [1], demostró que los problemas de conducción del calor pueden ser descritos expandiendo distribuciones de temperatura en series de ondas. Él y Poisson [2] propusieron utilizar estas ondas, denominadas en la actualidad ondas térmicas, para estimar las propiedades térmicas de los suelos en la corteza terrestre, haciendo uso de las variaciones diarias de la temperatura [3]. Casi 200 años después de estos trabajos, el estudio de la propagación del calor y la determinación de las propiedades térmicas de diferentes materiales, constituye un área activa de investigación en física aplicada. En particular, el estudio de la generación y la propagación de las ondas térmicas han dado lugar al surgimiento de un campo de investigación conocido como física de los fenómenos fototérmicos y de las técnicas asociadas [4,5].

Los suelos constituyen un sistema físico fácilmente accesible. Como se menciona por diferentes autores [6], el conocimiento de las propiedades térmicas es particularmente importante en el caso de estos sistemas, debido a diferentes causas. Por ejemplo, las semillas requieren de determinado umbral de temperatura para germinar. Dicho umbral depende, entre otras, de las propiedades térmicas del suelo y estas a su vez de diferentes factores como su composición, humedad, etc. La velocidad de enraizamiento y la longitud del ciclo vegetativo de las plantas dependen también de la temperatura del suelo [7]. Esta, por otra parte, determina la actividad de los microorganismos presentes en el suelo, gobernando procesos tan importantes como la humificación, la mineralización o la fijación de nitrógeno atmosférico. Además regula la evaporación del agua y por consiguiente el aprovechamiento de las lluvias. Los científicos están interesados en conocer el efecto que tienen sobre dichas propiedades distintos procesos naturales o artificiales. Mientras antiguamente los efectos de la contaminación ambiental se restringían a zonas cercanas a las fuentes de pululantes, es decir, a regiones industriales, actualmente muchos daños, como la acidificación de los suelos debida a las lluvias ácidas y a la deforestación, han sido relacionadas directamente con el aumento de la polución a largas distancias.

La porción de radiación que llega a la superficie del suelo depende de factores externos al mismo, entre ellos está la reflexión en las capas altas de la atmósfera seguida de la absorción atmosférica que está condicionada por la humedad y la cantidad de dióxido de carbono; ambos almacenan mucho calor, por su elevado calor específico, aunque también impiden la perdida de éste. Este es el conocido efecto invernadero, tanto mayor cuanto mayor lo es la concentración de ambas sustancias. También la presencia de una importante cubierta vegetal disminuye la intensidad de la radiación, no solo por efecto de la sombra sino por la absorción de calor que tiene lugar y la reflexión que provoca; algo similar ocurre con la presencia de nieve, con gran capacidad de reflexión; pero en ambos casos también se impide la pérdida por radiación por lo que el resultado final es una menor variabilidad diurna.

Una parte de la radiación solar es reflejada por la superficie del suelo y el resto es absorbida. Una vez que la radiación llega al suelo, el calentamiento o el enfriamiento del mismo será tanto mas rápido cuanto menor sea su calor específico y éste será función del material que lo constituye y sobre todo del nivel de humedad, pues como promedio los constituyentes minerales y los compuestos orgánicos tienen calores específicos con valores muy por debajo del valor que posee el agua. Los suelos húmedos se calentarán más lentamente que los secos pero mantendrán más el calor. Finalmente habrá que considerar el reparto de calor a lo largo del perfil, que será función de la conductividad térmica, que en las partículas del suelo es aproximadamente tres veces mayor que en el agua y unas 110 veces mayor que en el aire. De esta forma los suelos húmedos conducen mejor el calor que los secos, si bien existe una pérdida de éste por la evaporación de agua. Si la humedad aumenta de forma excesiva, las partículas sólidas pueden perder el contacto entre sí y disminuir la conductividad térmica, que tendrá un máximo para un determinado contenido de humedad, rebasado el cual se iniciará un descenso [8-13].

Para muchas de las aplicaciones es necesario hacer una estimación de la temperatura del suelo cuando éste no sufre perturbaciones, lo cual resulta extremadamente útil para comprender la naturaleza del problema. La distribución de temperatura del suelo ha interesado a los investigadores por más de un siglo. La predicción de la temperatura del suelo homogéneo sin perturbar se considera ahora un problema clásico de la teoría de conducción de calor para un sólido semi-infinito que tiene una fluctuación periódica de

temperatura en su superficie [14]. La variación de temperatura para suelos en capas es mucho más complicada [15] y existen en la actualidad numerosos trabajos en el tema. En la mayoría de los casos la determinación de las propiedades térmicas de los suelos es muy complicada. Labs y Harrington [16] realizaron un análisis de los valores de difusividad térmica ( $\alpha$ ) calculados por Kusuda [17]. El rango de valores para la difusividad térmica que obtuvieron varía de 0,36×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s y 0,8×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, correspondientes a suelos secos, medios y húmedos. Givoni y Katz [18] seleccionaron como valores límites  $\alpha = 0,4\times10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s para suelo seco y  $\alpha = 1,08\times10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s para suelo húmedo.

Algunos de los valores más usuales para la difusividad térmica de acuerdo al tipo de suelo se reportan en la *Tabla* 1.

| Tipo                         | Húmedo                | Rocoso                | Húmedo                | Seco                   | Húmedo                 | Seco                  |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| de suelo                     |                       |                       | y compacto            | y compacto             | y liviano              | y liviano             |
| <i>k</i> (W/mK)              | 2.4                   | 2.4                   | 1.3                   | 0.87                   | 0.87                   | 0.35                  |
| $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s) | 1.02×10 <sup>-6</sup> | 1.02×10 <sup>-6</sup> | 0.64×10 <sup>-6</sup> | 0.52 ×10 <sup>-6</sup> | 0.52 ×10 <sup>-6</sup> | 0.29×10 <sup>-6</sup> |

*Tabla* 1. *Conductividad y difusividad térmica para distintos tipos de suelo* [18,19]

El estudio experimental de la propagación del calor en suelos puede suministrar resultados muy interesantes. El conocimiento del flujo de calor a partir de mediciones de la distribución de temperatura en el suelo puede ayudar a entender procesos de ganancia y pérdida de calor [21-23]. En particular la medición de sus propiedades térmicas es un tema de gran interés. Existen diferentes métodos para ello. Algunos de ellos son discutidos en la literatura [24-28].

Entre ellos, las variantes que utilizan directamente las variaciones periódicas de la temperatura terrestre ofrecen ventajas como el bajo costo del equipamiento necesario y el relativamente simple mecanismo físico-matemático relacionado con el experimento.

Es en esta dirección que se enmarca la presente tesis, en la cual se describe un sistema experimental para la medición de las oscilaciones diarias de la temperatura del suelo a

diferentes profundidades y se proponen y comparan métodos para la determinación, a partir de la data experimental y de un modelo teórico, de la difusividad térmica. Los principales objetivos de la tesis se describen a continuación:

#### **OBJETIVOS.**

I- Diseñar y poner a punto un dispositivo experimental que permita la medición automatizada de la temperatura en el aire y en suelos a diferentes profundidades, *in-situ*, y de manera simultánea.

II- Realizar mediciones de temperatura en función del tiempo en el aire y en suelo a diferentes profundidades. Ajustar los resultados con ayuda de un modelo teórico basado en la solución de la ecuación de difusión del calor en presencia de fuentes de calor periódicas.

III- El cálculo de la difusividad térmica del suelo mediante tres métodos diferentes, derivados del modelo de ondas térmicas, y la comparación entre ellos. Ellos son: i-El *método de ajuste* (de la data experimental a la expresión que describe las variaciones de temperatura a diferentes distancias de la superficie del suelo en función del tiempo). ii-El *método de atenuación* (de ondas térmicas). iii- El *método del desfasaje* (de ondas térmicas).

En el capítulo I describiremos brevemente los fundamentos de la propagación del calor en sólidos haciendo énfasis en la correspondiente teoría en el caso de fuentes periódicas, en la cual se basarán los experimentos descritos. La metodología experimental será expuesta en el capítulo II, mientras que en el III reportaremos y discutiremos nuestros resultados. Al final del trabajo esbozaremos nuestras conclusiones y recomendaciones.

Los principales resultados de esta tesis han sido presentados en los siguientes eventos científicos:

- Primer Congreso Nacional de Investigación Estudiantil y Congreso de Investigación Politécnica. Centro Cultural "Jaime Torres bidet" del IPN, 12-14 de septiembre de 2005.
- Segundo Congreso Nacional de Investigación Politécnica, Centro Cultural "Jaime Torres bidet" del IPN, 12-14 de septiembre de 2006.
- XXVI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C. SMCTSM. 25-29 de septiembre de 2006, Puebla, Puebla.

#### Bibliografía de la introducción.

[1] J. B Fourier, *Analytical theory of Heat*, translated by A. Freeman (Encyclopedia Britannica, Inc., Chicago), 1952.

[2] S D Poisson 1855 *Theorie Mathematique de la Chaleur* (Paris: Bachelier, Imprimeur-Libraire).

[3] M. Alonso y E. J. Finn *Fundamental University Physics, III, Quantum and Statistical Physics* (Addison-Wesley Publishing Company) 1968.

[4] D. P. Almond, P. M. Patel, *Photothermal Science and Techniques* en *Physics and its Applications*, 10 E. R. Dobbsand y S. B. Palmer (Eds), Chapman y Hall, London, (1996).

[5] A. Mandelis, *Physics Today* **53**, 29, 2001.

[6] G. McIntosh, y B. S Sharratt, *The Physics Teacher*, **39**, 458, 2001.

[7] T. Chaco y G. Renuka Proc. Indian Acad. Sci. (Herat Planet. Sci.),111, 79, 2002.

[8] G. D. Bowen, Soil temperature, root growth, and plant function, en Y.Waisel, , A.

Eshel, y U. Kafkafi, eds., *Plant roots: the hidden half*, Ch. 15, Marcel Dekker, Inc., New York, 1991, pp. 309-330.

[9] J. A. Davies, S. B. Idso, In: Barfield, B. J., y Gerber, J. F., eds.. ASAE Monograph No. 2, Ch. 3.3,. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1979, pp. 183-210.

[10] R. J.Hanks, *Applied soil physics. Soil water and temperature applications*, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1992.

[11] D. Hillel, *Fundamentals of soil physics*, Academic Press, Toronto, 1980, pp. 217-224.

[12] N. J. Rosemberg, B. L. Blad, y S. B. Verma, *Microclimate: the biological Environment*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1983.

[13] P. J. Ross, J.Williams, y R. L. Mc. Cown, J Aust. Soil Res. 23, 515, 1985.

[14] H. S. Carlslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids* (Oxford Univ. Press, London, 1959).

[15] W. R. Van Wijk, y W. J. Derksen, Chapter 6 en Physics of Plant Environment. W.

R. van Wijk, ed., Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1966, pp. 102-143.

[16] K. Labs, y K. Harrington, *Proceedings Earth Shelter Performance and Evaluation*,L. L Boyer., ed. Stillwater, OK: Architectural Extension/Oklahoma State University, 1982, pp.41-51.

[17] T. Kusuda, Least Squares Analysis of Annual Earth Temperature Cycles for Selected Stations in the United States, Report Nº 9493, Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1968, 167 p.

[18] B. Givoni, y L Katz, *Earth Temperatures and Underground Buildings*, Kiryat Sede Boqer, Israel, Blaustein Institute for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, sin fecha, 30 p

[19] K. Labs, y K. Harrington, *Proceedings Earth Shelter Performance and Evaluation*, Boyer L. L., ed. Stillwater, OK: Architectural Extension/Oklahoma State University, 1982, 41.

[20] T. Kusuda, Least Squares Analysis of Annual Earth Temperature Cycles for Selected Stations in the United States, Report Nº 9493, Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1968, 167 p.

[21] A. Chowdhury, H. P. Das y A. D. Pujari, Mausam 42, 357, 1991.

[22] R. R. Kelkar, V. R. Chivale y R. C. Dobey, *Mausam*, **31**, 151, 1980.

[23] B. Padmanabhamurty, R. Amarlingeswara y R. Mukherjee Indian J. Radio Space Phys. 27, 199, 1998.

[24] K. L.Bristow, R. D. White, G. J. Kluitenberg, *Comparison of Single and Dual Probes for Measuring Soil Thermal Properties with Transient Heating*, Australian Journal of Soil Research **32**, 447,1994.

[25] P. J Bruijn, , I. A van Haneghem,., Schenk, J. *An Improved Nonsteady-State Probe Method for Measurements in Granular Materials*, Part 1: Theory. High Temperatures - High Pressures **15**, 359,1983.

[26] S Shiozawa, G. S Campbell, *Soil Thermal Conductivity*, Remote Sensing Rev. 5, 1990, pp 301-310.

[27] I. A Van Haneghem, J Schenk, H. P. Boshoven, A., *An Improved Nonsteady-State Probe method for Measurements in Granular Materials*, Part II: Experimental Results. High Temperatures - High Pressures 15, 367,1983.

[28] D. Defer, E. Antczak and B. Duthoid Meas. Sci. Technol. 39 496 1998.

# Capitulo I. Transferencia de calor en suelos.

#### I.1. Mecanismos de transferencia de calor en sólidos

Es un hecho bien conocido que cuando existe alguna diferencia de temperatura en el interior de un cuerpo tiene lugar una transferencia de calor de la región de mayor temperatura hacia la región donde esta es menor. Este transporte tiene lugar hasta que la temperatura del cuerpo es uniforme. De esta forma, la cantidad de calor, Q, transferida por unidad de tiempo, t, debe de ser una función,  $\Phi$ , de la temperatura en ambas regiones involucradas,  $T_1$  y  $T_2$ , de manera que:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \Phi(T_1, T_2) \tag{I.1}$$

Es importante señalar que tanto el valor del flujo de calor (Watts), como la forma de  $\Phi(T_1,T_2)$ , dependen de la naturaleza del mecanismo de transporte involucrado, el cual puede ser uno de los descritos a continuación. Inclusive pueden estar presentes más de uno de manera simultánea en un fenómeno determinado [1,2].

#### I.1.1. Radiación.

Es el intercambio continuo de energía, mediante ondas electromagnéticas, entre dos cuerpos. [3-7]. El valor de este flujo,  $\Phi_{rad}$ , radiado por un cuerpo rodeado por un medio a temperatura  $T_0$ , viene dado por la ley de Stefan-Boltmann:

$$\Phi_{rad} = \sigma A e \left( T^4 - T_0^4 \right) \tag{I.2}$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann, A es el área de la superficie del cuerpo que está irradiando y e es la emisividad de dicha superficie, que se encuentra a una temperatura absoluta T. Esta expresión se puede obtener a partir de la ley de radiación de Planck, la cual describe la intensidad espectral de energía (energía por unidad de tiempo, unidad de área de la superficie del cuerpo emisor y por intervalo de longitud de onda) emitida por un cuerpo negro como función de la longitud de onda y de la temperatura de su superficie:

$$I_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$
(I.3)

donde *h* es la constante de Planck,  $k_{\rm B}$  la de Boltzman, *c* la velocidad de la luz en el vacío y  $\lambda$  la longitud de onda de los fotones.

Un cuerpo negro es definido como aquel que es capaz de absorber toda radiación incidente de manera óptima, y en equilibrio térmico emite tanta radiación como la que absorbe. Sin embargo, ningún material es un emisor perfecto. La razón entre la intensidad espectral de energía radiada por una muestra real y un cuerpo negro (caso ideal) se define como la emisividad, que depende de las propiedades de la superficie, de la longitud de onda y de la temperatura. En la Ec. (I.2) e es la llamada emisividad total, la cual se obtiene a partir de la integración por todo el espectro de radiación. Un cuerpo negro es, por lo tanto, un estándar con el que pueden compararse otros radiadores.

En la medida que la temperatura absoluta aumenta, el máximo del espectro de radiación térmica se desplaza hacia las longitudes de onda más cortas, peculiaridad que se sistematiza en forma de una ecuación conocida como Ley de los desplazamientos de Wien, que expresa que el producto de la longitud de onda a la cual la intensidad espectral tiene su máximo valor,  $\lambda_{max}$ , por la temperatura absoluta del radiador, es igual a una constante, *b*, conocida como constante de Wien. Matemáticamente:

$$\lambda_{\max}T = b \tag{I.4}$$

#### Espectro solar.

La *Figura* I.1 muestra el espectro de radiación solar medido fuera de la atmósfera terrestre y en la superficie terrestre. La estructura del primero se debe a la composición de la atmósfera extrasolar, mientras que la del segundo a la absorción de la radiación solar por las moléculas presentes en la atmósfera terrestre que se muestran en la figura.

La curva discontinua representa el ajuste de los datos a la función (I.3) utilizando un valor de la temperatura absoluta igual a 5900 K. Nótese que a esa temperatura casi todo el espectro solar se encuentra en la región visible del espectro electromagnético. La superficie de La Tierra, por su parte, tiene una temperatura absoluta de aproximadamente 288 K. Según la expresión (I.4) es fácil darse cuenta que el espectro de radiación térmica emitido por el planeta tiene un máximo alrededor de los 10  $\mu$ m, es decir, el espectro aparece en la región infrarroja.



Figura I.1 Espectro solar a nivel del mar y fuera de la atmósfera. La curva discontinua es el ajuste a la Ec. 1.3 para T = 5900 K.

#### I.1.2. Convección.

El fenómeno de transporte de calor por convección tiene lugar mediante los movimientos macroscópicos de un fluido. Estos movimientos pueden ser causados por un agente externo (convección forzada) o mediante variaciones de la densidad provocadas por cambios de temperatura (convección libre). En general el análisis

matemático [1.1] de este tipo de fenómeno es bastante complicado. Son frecuentes los problemas para los cuales solo se puede obtener una solución numérica ó gráfica. El modelo mas simple que describe el fenómeno del flujo de calor por convección es aquel expresado mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\Phi_{conv} = hA(T_2 - T_1) \tag{I.5}$$

donde *A* es el área de la superficie de temperatura  $T_2$  por donde se produce el intercambio,  $T_1$  es la temperatura del fluido y *h* es una función que depende de muchos parámetros que están relacionados con las características del fluido y la geometría del sistema [9].

#### I.1.3. Conducción.

#### I.1.3.1. Conducción. Ley de Fourier y conductividad térmica.

La conducción puede ser entendida como un proceso de transporte de calor relacionado con la temperatura a escala microscópica en el interior de sólidos y fluidos en general. El flujo local de calor en una dirección, **r**, en un material homogéneo e isotrópico, se rige por la Ley de Fourier:

$$\Phi_{cond} = -kA\nabla T \tag{I.6}$$

La conductividad térmica, k, expresa la cantidad de calor transmitida por unidad de tiempo, t, por unidad de área, A, y por unidad de gradiente de temperatura  $\nabla T = dT/dr$ . El signo negativo indica que el flujo de calor tiene lugar en dirección opuesta al gradiente de temperatura. La conductividad térmica es una medida de la capacidad del material para conducir el calor y caracteriza problemas estacionarios de transferencia de calor. Aunque depende de la temperatura y de la presión, además de que en sólidos es altamente sensible a cambios estructurales, en la práctica, para rangos moderados de los parámetros mencionados, puede considerarse como constante.

# I.1.3.2 Conducción en estado no estacionario. Difusividad térmica y Capacidad calorífica específica.

Cuando un material está sujeto a un calentamiento o enfriamiento no estacionario, su temperatura dependerá tanto de la coordenada espacial como del tiempo. El problema en este caso puede ser analizado mediante la Ley de Fourier auxiliada por la ecuación de balance energético (Ley de conservación de la energía) [10]. Suponiendo además la Conductividad térmica constante en todo el material, se arriba a una ecuación diferencial en derivadas parciales de tipo parabólica, denominada usualmente Segunda Ley de Fourier o Ecuación de Difusión del Calor:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} - \alpha \nabla^2 T(x,t) = -\frac{Q(x,t)}{k}$$
(I.7)

donde  $\nabla^2$  es el operador de Laplace. Para un flujo unidimensional de calor la ecuación anterior tiene la forma:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{Q(x,t)}{k}$$
(I.8)

El parámetro Q representa posibles fuentes o sumideros de calor. El coeficiente  $\alpha$  denota la difusividad térmica, y es una medida de la rapidez con que se propaga la variación de temperatura a través del material. Este parámetro se define como:

$$\alpha = \frac{k}{C} \tag{I.9}$$

donde *C* es la capacidad calorífica específica, o capacidad calorífica por unidad de volumen , definida a su vez como el producto de la densidad del material,  $\rho$ , y el calor específico *c*:

$$C = \rho c \tag{I.10}$$

El calor específico es la cantidad de calor requerida para incrementar en un Kelvin la temperatura de un gramo de sustancia. Este parámetro caracteriza problemas estáticos de transferencia de calor.

#### Podemos definir la capacidad calorífica, C<sub>th</sub> como:

$$C_{th} = VC \tag{I.11}$$

donde V es el volumen de la muestra.

Generalmente el Calor específico a que se hace referencia en las ecuaciones anteriores es el Calor específico a presión constante debido a que en sólidos la diferencia de este parámetro con el calor específico a volumen constante es muy pequeña [11].

Vale la pena concluir este epígrafe recalcando las características fundamentales de los parámetros térmicos definidos arriba. El calor específico caracteriza la habilidad que tienen los materiales para almacenar el calor, describiendo además problemas estáticos donde la temperatura es independiente del tiempo y de la posición. Por otra parte, la Conductividad térmica es el parámetro fundamental cuando lidiamos con problemas estacionarios, donde la temperatura no varía en el tiempo, y en los cuales se verifica la Ley de Fourier para la conducción del calor. Finalmente, la difusividad térmica caracteriza fenómenos no estacionarios de conducción del calor, en los cuales la temperatura depende tanto del tiempo como de la posición. Como veremos en lo que sigue, en el caso particular en que las fuentes de calor varían periódicamente con el tiempo, la solución de la Ec. (I.8) toma la forma de "onda térmica" [12], en la que aparece involucrada una cuarta propiedad termofísica, la efusividad térmica,

$$\varepsilon = (kC)^{\frac{1}{2}} \tag{I.12}$$

Que determina la inercia térmica del material [13,14] y el transporte de calor a través de las intercaras de materiales diferentescomo se describe por varios autores [15-17]. Este parámetro describe también fenómenos transcientes de propagación de calor [18,19].

### I.1.3.3 Conducción no estacionaria en presencia de fuentes periódicas de calor. Ondas térmicas.

Consideremos un sólido homogéneo e isotrópico (sus propiedades son constantes en todo su volumen y a lo largo de cualquier dirección) cuya superficie es calentada uniformemente (de forma tal que el tratamiento unidimensional del problema sea

valido) por una fuente de intensidad modulada periódicamente de la forma  $I_0(1 + cos(\omega t))/2$ , donde  $I_0$  es la intensidad,  $\omega$  la frecuencia angular de modulación y t el tiempo [12-14].

La distribución de temperatura en el interior del sólido con difusividad térmica  $\alpha$  puede obtenerse resolviendo la ecuación de la difusión del calor:

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = 0 \quad , x \geq 0, \quad t \geq 0, \quad (I.13)$$

con la condición de frontera

$$-k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=0} = Re\left[\frac{I_o}{2}exp(i\omega t)\right], \qquad (I.14)$$

donde  $i=(-1)^{1/2}$ . Esta condición expresa que la energía térmica generada en la superficie del sólido es disipada hacia su interior mediante difusión.

La solución de interés en el caso que nos ocupa es la periódica. Si la separamos de la parte espacial de la solución, la temperatura puede escribirse como:

$$T(x,t) = \operatorname{Re}[\Theta(x)\exp(i\omega t)], \qquad (I.15)$$

Sustituyendo en (I.13) se obtiene

$$\frac{d^2\Theta(x)}{dx^2} - q^2\Theta(x) = 0, \qquad (I.16)$$

donde

$$q = \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha}} = (1+i)\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} = \frac{(1+i)}{\mu} , \qquad (I.17)$$

у

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad , \tag{I.18}$$

es denominada longitud de difusión térmica.

La solución general de la ecuación (I.16) con la condición de frontera (I.14) es

$$\Theta(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{I}_{o}}{2\varepsilon\sqrt{\omega}} \exp\left(-\frac{\mathbf{x}}{\mu}\right) \exp\left[-i\left(\frac{\mathbf{x}}{\mu} + \frac{\pi}{4}\right)\right]$$
(I.19)

El parámetro  $\varepsilon$  es la efusividad térmica de la muestra, definida em la sección anterior. La ecuación (I.9) muestra que  $(k\rho c)^{1/2}$  es el parámetro relevante, en vez de k,  $\rho$  y c por separado. La efusividad térmica determina la temperatura superficial  $\theta$  (x=0) y es una medida de la energía calorífica que se disipa en el sólido por grado de variación de su temperatura, después del inicio del proceso de calentamiento periódico. Por otra parte, si la onda térmica (I.19) se propaga a través de dos medios distintos, la efusividad representa la medida del desacople térmico entre ellos, al determinar los valores de los coeficientes de reflección y transmisión en la intercara [13-17].

La expresión (I.19) tiene el significado de una onda plana. Como otras ondas, posee una dependencia espacial oscilatoria de forma exp(iqx), con el número de onda q dado por la ecuación (I.17)). La ecuación (I.19) representa entonces una onda térmica, u onda de temperatura, y el producto de su primera derivada espacial y la conductividad térmica k ( $\phi(x)=-kd\Theta(x)/dx$ ) representa la onda de flujo calor correspondiente. Esta onda se propaga con la velocidad de fase  $v_f$  dada por:

$$v_f = \omega \mu = \sqrt{2\alpha\omega} \quad . \tag{I.20}$$

El parámetro  $\mu$ , la longitud de difusión térmica de la onda, es la distancia a la cual su amplitud se reduce "e" veces con relación a su valor en x=0. La onda térmica es, por tanto, atenuada. El producto  $2\pi\mu$  es la longitud de onda. Entre la excitación y la respuesta térmica de la muestra hay un desfasaje dado por el término  $(x/\mu + \pi/4)$  en el exponente complejo.

Como la ecuación (I.16) es una ecuación diferencial lineal, entonces la superposición de sus soluciones también es solución de ella. Esta superposición representa un grupo de

ondas con frecuencias angulares en el intervalo  $\omega$ ,  $\omega + d\omega$  propagándose con la velocidad de grupo:

$$v_g = \frac{1}{dq_R/d\omega} = 2\sqrt{2\alpha\omega} = 2v_f \quad , \tag{I.21}$$

donde  $q_{R}$ =Re(q).

La superficie de la Tierra está expuesta a fluctuaciones diarias regulares de temperatura que obedecen a diferentes causas. Estas variaciones pueden ser más o menos intensas, y varían de día a día, entre diferentes estaciones climáticas y de región a región. Por ello, la temperatura del aire y del suelo exhiben un ciclo diario. Las variaciones de la temperatura T(x,t) con el tiempo, t, y con la profundidad por debajo de la superficie del suelo, x, pueden describirse con ecuaciones como las derivadas encima para las ondas térmicas, o sea, sustituyendo (I.19) em (I.15) obtenemos

$$T(x,t) = \frac{I_o}{2\varepsilon\sqrt{\omega}} \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right) \operatorname{Re}\left\{ \exp\left[-i\left(\frac{x}{\mu} + \omega t + \frac{\pi}{4}\right)\right] \right\}$$

(I.22)

La medición de estas variaciones de temperatura en suelos, como ya hemos mencionado, constituye una manera de estudiar algunas peculiaridades de la propagación del calor en estos sistemas y de evaluar la influencia de diferentes factores sobre sus propiedades térmicas.

#### 1.1.3.4. Propiedades térmicas de suelos.

El calentamiento del suelo en las capas superiores de la corteza terrestre debido a procesos químicos y biológicos, radiactividad y conducción desde el núcleo terrestre pueden despreciarse al hacer el balance neto de energía, de manera que la temperatura real de la superficie está determinada principalmente por la incidencia de radiación solar. El flujo de calor que llega a la superficie de la tierra desde su interior es de aproximadamente  $42 \times 10^{12}$  W [8]. Suponiendo que no hubiese incidencia de radiación solar, en condiciones de equilibrio termodinámico este flujo de calor debe ser igual al emitido según la Ley de Stefan-Boltzman, lo que conduce a una temperatura en la

superficie terrestre de 35 K. Teniendo en cuanta el balance energético entre esta radiación y la emitida por el planeta, Boeker y Grondelle [8] estiman un valor de la temperatura de la superficie terrestre de 255 K, menor en 33 grados que la real, mencionada antes. La diferencia es debida al llamado efecto invernadero producido por la absorción de parte de la radiación emitida por La Tierra por gases presentes en la atmósfera, que provoca el calentamiento de esta, con la consecuente re-emisión de radiación.

Los principales parámetros que definen el comportamiento térmico de un suelo son su calor específico, su difusividad, su efusividad y su conductividad térmica, relacionados entre sí a través de las ecuaciones (I.9) a (I.12), pero para que se produzca un calentamiento de los diversos horizontes edáficos, es necesario que la radiación solar llegue hasta la superficie y penetre en ella [20]

Como hemos visto antes, la porción de radiación que llega a la superficie del suelo depende de factores externos al mismo, entre ellos está la reflexión en las capas altas de la atmósfera seguida de la absorción atmosférica que está condicionada por la humedad y la cantidad de dióxido de carbono principalmente. También la presencia de una cubierta vegetal disminuye la intensidad de la radiación, como mencionamos antes. Otro factor decisivo es la orientación con respecto a la topografía, las zonas orientadas al sur, en el hemisferio norte, reciben los rayos solares con mayor perpendicularidad y por ende con mas intensidad, sobre todo cuando la pendiente es la adecuada a la latitud. Una parte de la radiación solar es reflejada por la superficie del suelo y el resto es absorbida. Las radiaciones más caloríficas son las correspondientes al infrarrojo, mientras que las menos corresponden al ultravioleta, aunque éstas sean más energéticas por su mayor frecuencia. Una vez que la radiación llega al suelo, el calentamiento o el enfriamiento del mismo serán tanto mas rápido cuanto menor sea su calor específico y éste será función del material que lo constituye y sobre todo del nivel de humedad. El reparto de calor a lo largo del perfil, será función de la conductividad térmica, que en las partículas del suelo es aproximadamente 3 veces mayor que en el agua y unas 110 veces mayor que en el aire. De esta forma los suelos húmedos (en los que hay un desplazamiento del aire por el agua) conducen mejor el calor que los secos. Si la humedad aumenta de forma excesiva, las partículas sólidas pueden perder el contacto entre sí y disminuir la

conductividad térmica, que tendrá un máximo para un determinado contenido de humedad, rebasado el cual se iniciará un descenso.

Las propiedades térmicas de los suelos dependen de algunas características de los mismos, como su *porosidad* y *composición*:

#### Porosidad.

La *porosidad* del suelo viene representada por el porcentaje de huecos existentes en el mismo con respecto al volumen total. Ella depende, a su vez, de la *textura*, la *estructura* y la *actividad biológica* [21]. La primera está determinada por la distinta proporción de arena, limo y arcilla de cada uno de los horizontes [22]. Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los huecos entre ellos, salvo si las partículas más finas se colocan dentro de esos huecos o si los denominados cementos coloidales los obturan. Se denominan elementos gruesos a los fragmentos de roca y granos minerales con un diámetro mayor de 2 mm. Es común que los suelos con elementos gruesos presenten poros también gruesos y los suelos limosos y arcillosos, huecos muy numerosos pero de pequeño tamaño [23]. Las partículas que componen los suelos varían en tamaño desde pocos micrómetros (minerales de la arcilla) hasta varios milímetros (granos de arena). Esta fracción del suelo se denomina tierra fina y está formada por todas las partículas menores de 2 mm. Es sobre esta fracción sobre la que se determina la textura de un suelo [24]. La tierra fina puede dividirse en tres clases:

- arena: diámetros de partículas entre 0.02 y 2.0 mm.
- limo: diámetros de partículas entre 0.02 y 0.002 mm.
- arcilla: diámetros de partículas menores de 0.002 mm.

Por su parte, la influencia de la *estructura* es tan evidente que a menudo se utiliza el valor de la porosidad para dar una idea de la estructura del suelo; además los agentes que destruyen la estructura disminuyen la porosidad, como por ejemplo el apisonado [21]. La estructura afecta a un numeroso grupo de características físicas del suelo pero sobre todo controla la porosidad del mismo, la cual permite entre otras la circulación del agua, determinando el *contenido de humedad* del suelo. El conocimiento de la humedad del suelo es relevante tanto para la investigación climática, la agricultura, como para todas aquellas ramas de la ciencia y la técnica donde la corrosión de conductos

metálicos soterrados (para guía de cables eléctricos, conducción de agua y combustibles, etc) debido a la acción del agua sea un problema [25]. Hay que destacar que mediciones de la humedad de suelos requieren el uso de equipamiento relativamente caro, como son las sondas de neutrones [26] o reflectometría en el dominio del tiempo [27], lo cual ha tenido como consecuencia que existan muy pocos reportes de este parámetro que cubran grandes intervalos de tiempo. Excepciones son los datos de mediciones gravimétricas hechas en la antigua Unión Soviética [28-29] y un estudio de 10 años hecho en Illinois (USA) usando pruebas de neutrones [30]. Debido a ello varios autores han demostrado la validez del método de medir el contenido de humedad de los suelos a partir de los valores de sus propiedades térmicas a diferentes profundidades, en particular la difusividad. Para ello se ha hecho uso de relaciones semi-empíricas [31-32] y empíricas [33] para la relación entre ambos parámetros. Führer [34] hizo recientemente una revisión de los principales trabajos en la temática.

El tercer factor que influye sobre la porosidad es la *actividad biológica* del suelo, especialmente la de la microfauna. En los suelos cuya actividad biológica es intensa se observa con frecuencia, al lado de las huellas del recorrido de las lombrices, un gran número de canalículos finos que resultan del trabajo de pequeños insectos. Cuando este tipo de poros resulta predominante se dice que el suelo tiene una porosidad tubular [21].

#### Composición.

El suelo está compuesto por cuatro constituyentes principales: componentes sólidos inorgánicos (minerales y materiales amorfos o policristalinos), materia orgánica, aire, y agua [35]. Los componentes sólidos inorgánicos pertenecen a dos grupos principales, los denominados minerales primarios, provenientes de la roca madre y los minerales secundarios, formados en el suelo por meteorización química y que son casi siempre de grano fino o muy fino (tamaño limo o arcilla). La materia orgánica deriva sobre todo de los restos de plantas parcial o totalmente descompuestos, aunque una pequeña parte está formada por restos animales. Está compuesta por celulosa, almidón y lignina en diferentes estados de descomposición. En suelos pediales (con estructura), los componentes sólidos inorgánicos y la materia orgánica están unidos formando unidades estructurales discretas, los agregados, rodeados de poros abiertos, ocupados por el aire y el agua. En los suelos saturados, prácticamente todo el aire ha sido eliminado. En suelos

con buen drenaje, el agua se adhiere a los componentes sólidos inorgánicos particulados.

#### Teorías de medio efectivo.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente descrito, los suelos pueden considerarse materiales compuestos, o composites, y por tanto, para modelar la dependencia de sus propiedades térmicas de la porosidad o del contenido de determinada componente (ejemplo, la humedad), se hace uso generalmente de las denominadas teorías de medio efectivo. Ellas consideran al material compuesto de dos fases, una sólida dispersa en otra sólida continua, o una sólida conteniendo poros dispersos, como es el caso de los materiales granulares como los suelos. En un suelo húmedo, estos poros deben estar constituidos por agua, o por agua y aire en dependencia del grado de humedad.

Denotemos con  $\varphi$  la fracción volumétrica de la fase dispersa, y con los subíndices 0 y 1 las fases continuas y dispersas respectivamente. Para un sistema de este tipo, la mayoría de los autores plantean que la capacidad calorífica específica debe cumplir con [36-41]

$$C_{eff} = (1 - \varphi)C_0 + \varphi C_1 \tag{I.23}$$

Para la dependencia de la conductividad térmica efectiva de  $\varphi$  existen reportados diferentes modelos. Recientemente J A P Lima y col. hicieron uso de los modelos de las mezclas logarítmicas y del modelo del mezclado serial [42] para describirlas propiedades térmicas de compuestos líquidos [43] y gaseosos [41], modelo que pese a su sencillez no es muy utilizado en el caso de materiales sólidos, aunque algunos autores han hecho uso de modelos similares para correlacionar la conductividad con el contenido de agua en suelos [34].

La primera contribución importante para estimar la conductividad térmica de sólidos heterogéneos se debe a Maxwell [43] Para pequeñas fracciones volumétricas  $\phi$ .

$$\frac{k_{eff}}{k_0} = 1 + \frac{3\phi}{\left(\frac{k_1 + 2k_0}{k_1 - k_0}\right) - \phi}$$
(I.24).

Esta ecuación ha sido utilizada con éxito por varios autores para explicar sus resultados experimentales [36-39].

Para inclusiones no esféricas se pueden mencionar los trabajos de Rayleigh [44] Odelevskii [45], Euler [46], de Vries [47], Woodside y Messmer [48], y Argo y Smith [49]. Pero uno de los modelos más utilizados es el de Hamilton y Crosser, [50] según el cual:

$$k_{eff} = k_0 \frac{\lambda + (n-1) - (n-1)(1-\lambda) \cdot \varphi}{\lambda + (n-1) + (1-\lambda) \cdot \varphi}$$
(I.25)

donde  $\lambda = k_1/k_0$ ,  $n = 3/\psi$  es un factor de forma y  $\psi$  describe la razón del area superficial de una esfera de volumen idéntico al del poro, con respecto al área superficial de este ultimo (para partículas esféricas  $\psi = 1$  y n = 3, y se obtiene el mismo resultado reportado por Maxwell).

Con las expresiones para  $C_{\text{eff}}$  y  $k_{\text{eff}}$ , se pueden obtener los valores efectivos de la difusividad y efusividad térmicas utilizando las definiciones (I.9) y (I.12) respectivamente.

Cabe resaltar, sobre la base de lo expresado arriba, la importancia que tiene realizar mediciones de propiedades térmicas de suelos *in situ*, ya que en el proceso de extracción de muestras para mediciones en laboratorio pueden cambiarse características como la porosidad y consecuentemente las propiedades a investigar.

### Bibliografía del Capítulo.

[1] Landolt-Bornstein, *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*: New Series III, edited by O Madelung, 2003.

[2] O. Madelung and G. K.White, 2.3.1.11. *Thermal Transport* pp 2-217 (Springer: Berlin, 2005).

[3] H. Haken y H. C. Wolf, *The Physics of Atoms and Quanta: Introduction to Experiments and Theory* (Springer Verlag: Berlin Heidelberg) 2000.

[4] K. Krane, *Modern Physics* (John Wiley and Sons: New York) 1983; R Eisberg y R Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles* (John Wiley and Sons: New York) 1985.

[5] E. Segrè, *From X-Rays to Quarks: Modern Physicists and their Discoveries* (W H Freeman and Co., New York) 1980

[6] M. Alonso y E. J. Finn, *Fundamental University Physics, III, Quantum and Statistical Physics* (Addison-Wesley Publishing Company) 1968.

[7] J. W. Rohlf, Modern Physics from  $\alpha$  to  $Z^{\circ}$  (John Wiley & Sons: NY) 1994.

[8] E. Boeker y R. Van Grondelle, *A Physics approach to environmental problemas*, Cap. I (John Wiley and Sons: 2001)

[9] E. Marín, O. Delgado-Vasallo and H. Valiente, *American Journal of Physics*, **71**, 1032, (2003).

[10] H. S. Carlslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids* (Oxford Univ. Press, London, 1959).

[11] J. E. Parrot y A. D. Stuckes, *Thermal Conductivity of Solids*, Pion Limited London (1975).

[12] E. Marín, J. Marín-Antuña y P. Díaz-Arencibia, Eur. J. of Phys. 23, 523, 2002.

[13] D. P. Almond, P. M. Patel, *Photothermal Science and Techniques en Physics and its Applications*, 10 E. R. Dobbsand y S. B. Palmer (Eds), Chapman y Hall, London, (1996).

[14] B. K. Bein y J. Pelzl "Analysis of Surfaces exposed to Plasmas by Nondestructive Photoacoustic and Photothermal Techniques" in *Plasma Diagnostics, Surface Analysis and Interactions*, Academic, New-York, (1989).

[15] C. A. Bennett y R. R. Patty, Appl. Opt. 21, 49, 1982.

[16] J. Shen y A. Mandelis, Rev. Sci. Instrum. 66, 4999, 1995.

- [17] J. A. P. Lima y col, Rev. of Sci. Inst. 71, 2928, 2000.
- [18] E Marín, *The Physics Teacher*, **44**, 432, 2006.
- [19] E. Boeker y R. van Grondelle, *Physics approach to environmental problemas*, Cap.
- I (John Wiley and Sons: 2001)
- [20] http://www.unex.es/edafo/ECAP/ECAL5PFPropTerm.htm.
- [21] http://www.unex.es/edafo/ECAP/ECAL5PFPorosidad.htm
- [22] J. Bachmann, R. Horton, T. Ren, and R.R. Van der Ploeg, *Soil Sci. Soc. Am. J*, **65**, 1675, 2001.
- [23] http://www.edafologia.net/introeda/tema04
- [24] http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/globe/pvg/texture2.htm
- [25] J E Marr, N Bates, D Portelance y S Farthing, *The role of soil data in pipeline integrity*, Proceedings of IPC (October 4-8, 2004) Calgary, Alberta, Canada.
- [26] T Ren, G J Kluitenberg y R Horton, Soil Sci. Soc. Am. J 64, 552, 2000.
- [27] T E Ochsner, R Horton y T Ren, Soil Sci. Soc. Am. J, 65, 1618 (2001).
- [28] K. Y.Vinnikov, and A. Robock, *Journal of Geophysical Research*, 101, 7163–7174, 1996.
- [29] K. Y. Vinnikov, and I. B. Yeserkepova, Journal of Climate, 4, 66-79, 1991
- [30] S. E Hollinger, and S. A. Isard, Journal of Climate, 7, 822-833, 1994
- [31] D. A. De Vries, Bulletin Inst. Int. du Froid, vol. 1, pp. 115–131, 1952b.
- [32] D. A. De Vries, and N. H. Afgan, *Heat and mass tranfer in the biosphere*, John Wiley and Sons, 1975.
- [33] M. S. Kersten, Bulletin of the University of Minnesota, Institute of Technology, 52, 1–225, 1949.
- [34] O. Fuhrer, *Inverse Heat Conduction In Soils A New Approach Towards Recovering Soil Moisture From Temperature Records* Diploma Thesis ETH Zürich, Dept. Physics March 2000
- [35] T Ren, K Noborio y R Horton, Soil Sci. Soc. Am. J, 63, 450, 1999.
- [36] N. F Leite and Lc. M. Miranda, J. Mater. Sci, 27, 5449, (1992)
- [37] A. M. Mansanares, A. C. Bento, H. Vargas, N. F. Leite, L. C. M. Miranda Phys. Rev. B 42, 4477, (1990).
- [38] A. Cruz-Orea, I. Delgadillo, H. Vargas, A. Gudiño-Martínez, E. Marín, C. Vázquez-López, A. Calderón and J. J. Alvarado-Gil. J.Appl Phys, **79**, 8951, (1996)
- [39] E. Marín, S. García O. Delgado-Vasallo, J. Portelles, G. Peña rodríguez, A. Calderón, E. Martínez and J. M. Siqueiros. Journal de Physique IV 125, 309 (2005.

- [40] J.A.P. Lima, E. Marín, M.S.O. Massunaga, O. Correa, S.L. Cardoso, H. Vargas y L.C.M. Miranda Applied Physics B: Lasers and Optics **73**, 151, 2001.
- [41] J.A.P. Lima, E. Marín, M. G. da Silva, M. S. Sthel, D. U. Schramm, S. L. Cardoso,
- H. Vargas y L. C. M. Miranda, Measurement Science and Technology, 12, 1949, 2001.
- [42] R.P. Tye: Thermal Conductivity (Academic, New York 1969).
- [43] J. C. Maxwell, Oxford University Press, 3rd Ed. (1891, reimpreso en 1998).
- [44] J. W. Strutt (Lord Rayleigh), *Phil. Mag.* (5), **34**, 431,1892.
- [45] V.L. Odelevskii, J. Tech. Phys. (USSR), 24, 667, 1954 y V.L. Odelevskii, J. Tech.
- Phys. (USSR), 24, 697, 1954.
- [46] F. Euler, J. Appl. Phys., 28, 1342, 1957.
- [47] D.A. de Vries, Mededelingen van de Landbouwschool te Wageningen, 1954.
- [48] W. Woodside and J. H. Messmer, J. *Appl. Phys.*, **32**, 1688, 1961 y W. Woodside and J. H. Messmer, J. *Appl. Phys.*, **32**, 1699, 1961.
- [49] A. L. Loeb, J. MER, Ceramic Soc., 37, 96, 1957.
- [50] R. L. Hamilton and O K Crosser, IEC Fundam., 2, 187, 1962.

# Capitulo 2. Metodología experimental

#### II.1. Sistema de medición.

La *figura* II.1 muestra esquemáticamente el sistema experimental propuesto para las mediciones de temperatura en función del tiempo y que hemos desarrollado inspirándonos en trabajos previos de McIntosh and Sharratt [1] y Marín, Jean-Baptiste y Hernández [2].

El instrumento que utilizamos para medir las oscilaciones de temperatura en la superficie del suelo en el transcurso del día, esta basado en sensores de temperatura de estado sólido LM35, los cuales son colocados dentro de una sonda, la cual será introducida en el suelo para medir la temperatura de este a diferentes profundidades. La sonda cuenta con 8 sensores los cuales están separados 5cm uno del otro, lo que hace que la sonda tenga una longitud de 46cm de los cuales 6cm corresponden a la punta de la sonda para una fácil introducción en el suelo.

Una vez introducida la sonda, el primer sensor se mantiene a 5cm sobre de la superficie del suelo para medir la temperatura del aire, mientras el resto nos permite sensar a distintas profundidades, que van desde la superficie hasta 30cm debajo de ella.

Los sensores están conectados con una computadora personal Pentium IV, usando un convertidor analógico-digital vía puerto serial, que nos convierte la señal analógica que nos da el sensor en una señal digital para procesar los datos y posteriormente analizarlos. El control de adquisición de datos y el software de procesamiento se desarrollaron usando Visual Basic, programa con el que se diseñó un panel frontal que incluye controladores para seleccionar la velocidad de muestreo, el número de mediciones, indicadores para mostrar la temperatura actual como la medida por el sensor LM35, así como una barra del porcentaje de muestras adquiridas, como describiremos mas adelante.



Figura II.1. Esquema del dispositivo de medición

#### II.1.1. Sensor de temperatura

Un *sensor* es un dispositivo capaz de suministrar una corriente o un voltaje que depende significativamente de alguna variable física o química en cuyo comportamiento estamos interesados, en nuestro caso, la temperatura. Por ejemplo, una simple resistencia metálica cuyo valor cambia con la temperatura, puede ser un sensor adecuado para estudiar el calentamiento o enfriamiento de un cuerpo. Si de antemano hemos calibrado el sensor, es decir, si conocemos la relación resistencia Vs temperatura, podemos estudiar el fenómeno cualitativa y cuantitativamente. En nuestro trabajo utilizamos el sensor de estado sólido LM35 de la *National Semiconductor* [3].

#### Características generales del LM35.

El LM35 [3] (*Figura* II.2) es un circuito integrado que funciona como sensor electrónico al ser equivalente a un diodo Zener con un voltaje de ruptura muy sensible a los cambios de temperatura. Entrega entre sus terminales una tensión proporcional a la temperatura absoluta, que puede ser registrada en una computadora personal con ayuda de una tarjeta de adquisición de datos. El coeficiente de proporcionalidad es constante e igual a 10mV/grado, por tanto para obtener una calibración absoluta (de manera que la

curva extrapolada pase por 0 Kelvin) sólo hace falta un punto de calibración y se logra con un potenciómetro que se le conecta. Estos sensores no se caracterizan por una elevada precisión, sino porque son baratos y fáciles de usar. Para mediciones de más precisión se pueden utilizar resistencias de platino o termopares.



Figura II.2. Sensor de Temperatura LM35

El LM35 está disponible en encapsulado plástico de manera análoga a los transistores, en TO-46. Entre sus principales características pueden mencionarse las siguientes:

- *Opera con un voltaje entre 4 y 30 volts.*
- ▶ Esta calibrado directamente en °C (centrigrados).
- > El factor de escala está en +10mV por cada grado centígrado.
- ➤ Tiene una precisión garantizada de 0.5 °C de variación (a 25°C).
- Su rango de medición va de -55 °C a +150 °C.
- ▶ No existe linealidad solo  $a \pm 1/4$  °C.
- > Baja impedancia de salida de  $0.1\Omega$  para una carga de 1mA de corriente.

La forma física del dispositivo vista inferiormente se muestra en la Figura II.3.



Figura II.3. Forma física del LM35.

La conexión que se utilizará para este dispositivo se muestra en la Figura II.4.



Figura II.4. Muestra la conexión típica del LM35.

Debido a las características mencionadas del dispositivo se considero que es útil para medir la temperatura que será registrada por el instrumento a construir.

Debido a que el convertidor necesita un generador de pulsos externos (reloj) para realizar las conversiones continuamente, es necesario diseñar uno, para lo cual se utilizó un circuito integrado LM555 (*fabricado por National Semiconductor*), que describiremos mas adelante.

#### II.1.2. Convertidor analógico – digital

Un convertidor analógico-digital (ADC, *Analogic to Digital Converters*) es un circuito que tiene una línea de entrada análoga y n líneas de salidas digitales. Genera un código binario que es proporcional a la entrada de voltaje análoga.

Todos los ADC's requieren al menos un comparador análogo, un elemento que acepte dos entradas analógicas de voltaje y produzca una salida digital. Diferentes tipos de convertidores analógicos a digitales han sido desarrollados a través del tiempo. Los más populares son el de rampa ó escalera y el de aproximaciones sucesivas.

El ADC de rampa es el más lento y simple de los ADC secuenciales. El registro de resultados es un contador de n – bits que se pone en cero al comenzar la conversión. Mientras la salida del convertidor DAC sea menor que la entrada analógica, al contador se le permite seguir contando. Cuando la salida del DAC sea mayor que la entrada analógica el contador se detiene, su valor almacenado
es el resultado. Esta técnica requiere un máximo de  $2^n$  pasos para realizar la conversión de n bits.

El ADC de aproximaciones sucesivas requiere solo "n" ciclos de reloj para lograr una aproximación de n – bits. Este circuito opera de la siguiente manera. En el primer pulso de reloj el S.A.R. (registro de aproximaciones sucesivas) es puesto en 1 si la salida del comparador se mantiene alta, este bit es mantenido en 1; si el comparador tiene una salida baja, el MSB es puesto en 0 por el S.A.R.

En el próximo pulso de reloj el bit número 6 es puesto en 1, y como antes, si la salida del comparador es alta, este bit es mantenido en lógica 1. Este procedimiento es repetido seis veces más y después de un total de 8 ciclos, la conversión esta completa.

Hay diferentes tipos de convertidores analógicos – digitales en el mercado. Sin embargo habrá que seleccionar uno para este proyecto. El ADC que se propone es el *ADC0809* fabricado por National Semiconductor. Las características que presenta este circuito integrado son las siguientes:

- Opera con 5 Vcd.
- No se requiere de un ajuste de cero ó de escala total.
- Tiene ocho canales de entradas analógicas con direccionamiento lógico.
- Voltaje de entrada de cero a cinco volts.
- Las salidas son totalmente compatibles con la tecnología TTL.
- Resolución de 8 bits.
- Bajo consumo de potencia (15mwatts).
- Tiempo de conversión de 100 µseg.

Analizando las características de este convertidor podemos decir que es viable ocuparlo para el propósito del proyecto. El convertidor analógico – digital físicamente es como se muestra en la *Figura* II.5.



**Figura II.5.** Pin-out del convertidor analógico-digital número ADC0809, fabricado por la compañía Nacional Semiconductor.

El convertidor *ADC0809* y *ADC0808* son componentes de adquisición de datos con ocho entradas para conversión A/D. El convertidor usa la técnica de aproximaciones sucesivas. Este tiene a su entrada un comparador con una gran impedancia de entrada y un divisor de voltaje de 256 resistencias con un árbol de switch analógico y el registro de aproximaciones sucesivas. El dispositivo elimina la necesidad de ajustes a cero y a escala total.

El convertidor ADC0809 ofrece una alta velocidad, alta exactitud, mínima dependencia de la temperatura y una excelente repetibilidad, además de consumir una mínima cantidad de energía. El dispositivo contiene un multiplexor de señal analógica de ocho canales y un canal particular de entrada para las líneas de dirección del decodificador. La *Tabla* II.1 muestra los estados de entrada para las líneas de dirección para seleccionar cualquier canal.

|                    | Direcciones Binarias |   |   |
|--------------------|----------------------|---|---|
| Canal Seleccionado | С                    | В | Α |
| INO                | L                    | L | L |
| IN1                | L                    | L | н |
| IN2                | L                    | Н | L |
| INз                | L                    | н | н |
| IN4                | н                    | L | L |
| IN5                | н                    | L | н |
| IN6                | н                    | Н | L |
| IN7                | Н                    | Н | Н |

Tabla II.1. Tabla de selección de canal del ADC0809.

La red 256R está fundamentada en la escalera R/2R convencional, la cual no causa variaciones por carga en el voltaje de referencia.

A continuación se muestra la escalera de resistores y el árbol de *switcheo* en la *Figura* II.6.



Figura II.6. Diagrama eléctrico interno del convertidor analógico – digital.

Los valores de las resistencias superior ó inferior no son los mismos que los restantes. El registro de aproximación sucesiva del convertidor es puesto en reset en el filo positivo de un pulso de SC (*Start of Convertion*). La conversión comienza en el filo de bajada del pulso de SC. Si se requiere una conversión continua, se requerirá conectar la salida EOC (*End of Conversión*) a la entrada SC. El fin de conversión será de 0 a 8 pulsos de reloj después del filo de subida de CS. La sección más importante del convertidor analógico–digital es el comparador. Esta es la sección responsable de la exactitud del convertidor ya que tiene influencia en la repetición del convertidor.

El propósito principal de utilizar un convertidor analógico-digital es para poder interpretar los datos de temperatura entregados por los transductores.

# Diseño del circuito de reloj con el LM555.

El circuito integrado LM555 (ver *Figura* II.7), es un dispositivo altamente estable para generar tiempos de retardo precisos ó alguna oscilación. En el modo de retardo de tiempo, el tiempo es controlado por un capacitor y un resistor externo. Para una operación astable, como un oscilador, la frecuencia de oscilación y la duración del ciclo son controlados con dos resistores externos y un capacitor. Entre sus características principales están las siguientes:

- Reemplazo directo por los circuitos integrados SE55 ó NE555.
- > Tiempo de operación desde microsegundos hasta horas.
- Operación astable y monoestable.
- Compatibilidad con la tecnología TTL.
- ► Estabilidad en temperatura menor a 0.005% / °C.
- Rango de alimentación desde 5V hasta 15V.
- La corriente de la fuente cuando se alimenta con 5 V es menor de 1mA.



Figura II.7. Diagrama eléctrico del (RELOJ).

Si el circuito es conectado como lo muestra la *Figura* II.8 se disparará por si solo y correrá libremente como un multivibrador no estable. El capacitor externo se carga a través de Ra+Rb y se descarga a través de Rb, de tal modo que la duración del ciclo puede ser precisamente ajustada mediante la razón de estos dos resistores.



Figura II.8. Conexión del reloj como multivibrador no astable.

En este modo de operación el capacitor se carga y descarga entre 1/3 de Vcc y 2/3 Vcc. En la *Figura* II.9 se muestran también las formas de onda de este modo de operación del circuito. El tiempo de carga (salida en alto) está dado por la expresión:

$$t_1 = 0.693(Ra + Rb)C$$

y el tiempo de descarga (salida en estado bajo) está dado por la expresión:

 $t_2 = 0.693 (Rb) C$ 

de tal modo que el periodo total está dado por la expresión:

$$T = t_1 + t_2 = 0.693(Ra + 2Rb)C$$

Existen algunas curvas que rigen el funcionamiento del oscilador en cuanto a los valores de los resistores y el capacitor para las frecuencias de oscilación. Estas curvas se muestran en la *Figura* II.9 con los cuales se marca una pauta para la elección de los resistores externos y el valor de la capacitancia externa.



*Figura* II.9.. *Graficas de un LM555 en configuración astable: a) Tiempo de carga y descarga; b) valores de capacitores y resistores para una determinada frecuencia.* 

De aquí proponemos un valor del capacitor de  $0.01\mu$ F y un valor de resistencia de 2.2  $\Omega$  para obtener una frecuencia de aproximadamente15 kHz., con lo cual se cumple el objetivo de generar el pulso de reloj.

Una vez diseñado el oscilador, se introduce la señal por el pin 10 del ADC0809. Después de que ya se tiene listo el oscilador, se hacen algunas conexiones más en el ADC0809, como son: el *Output Enable* (OE), o sea el habilitador del latch de salida de los8 bits digitales, ya sea a un 1 lógico (+Vcc) ó a un 0 lógico (GND). Debido a que para habilitar el *OE* se debe introducir por su pin un 1 lógico, entonces el pin 9 se conectará a +Vcc (o sea +5V).

A su vez la ALE (habilitador de la dirección del canal) se encarga de habilitar uno de los 8 canales de entrada analógica.

Esta selecciona un canal con un cambio en la transición de alto a bajo (1 lógico a 0 lógico), cabe mencionar que al igual que ALE, la conversión de datos se efectúa con una transición de un estado lógico alto a bajo en START (pin 6 del ADC0809) por lo que se puenteará ALE con START ó viceversa.

Lo que se pretende hacer con este arreglo es controlar la velocidad de conversión del ADC0809 al igual que la selección del canal a leer y convertir utilizando la *Tabla* II.1. Cabe mencionar que este pulso se enviará por medio del puerto paralelo de la PC.

Las 2 ultimas conexiones que faltan del ADC0809 son el voltaje de referencia (+) y el voltaje de referencia (-), o sea el limite superior e inferior. Lo que se pretende de este instrumento es que tenga una buena exactitud, y como la exactitud del ADC depende del número de bits de salida y de los voltajes de referencia, entonces como los bits de salida son 8 se tendrán que convertir  $2^n$  iteraciones que serán requeridos para convertir n bits, en este caso serian  $2^8 = 255$  iteraciones con un tamaño de cada paso ó escalón que será ajustado por los voltajes de referencia en los pines 12 y 16.

Debido a que ya no es posible modificar el número de bits de salida del ADC0809 (8 bits), entonces se modificaran los voltajes de referencia mediante un circuito conectado individualmente por cada pin (12 y 16).

A manera de ejemplo y para ilustrar lo mencionado anteriormente acerca de la exactitud, supondré que el LM35 entrega una lectura de 200 mV (equivalente a 20°C) y esta conectado a un canal del ADC y que el ADC tiene un voltaje de referencia  $V_{ref}(-) = 0$  volts y  $V_{ref}(+) = 5$  volts. El tamaño del escalón será de:

Es importante mencionar que el escalón es el tamaño del paso entre un número binario y otro, en el que su magnitud estará dada en función de los voltajes de referencia del ADC y del voltaje analógico fijado en uno de sus canales. En la *Figura* II.10 se muestran lo que son los escalones de los bits con respecto a un voltaje analógico.



Figura II.10. Escalones generados en la etapa de conversión de un ADC.

*Tamaño del escalón*=
$$\frac{5V}{255}$$
=19.6mV ≈ 20mV *por cada escalón*

Si el tamaño del escalón es por cada 1 mV, entonces la conversión del ADC0809 indicará:

Por regla de 3 se tiene:

$$x = \frac{255 \times 0.2}{5} = 10.2 \approx 10$$

que en número hexadecimal corresponde al **0**A, por tanto en los bits de salida se tendrá: *00001010* 

Ahora bien, suponiendo que en el  $V_{ref(+)}$  se fija un voltaje de 250 mV, veremos un cambio notorio en el paso del escalón, que es lo que nos marca una diferencia en la exactitud de la medición. El tamaño del escalón será por tanto:

Tamaño del escalón = 
$$\frac{250 \text{mV}}{255}$$
 = 0.98mV ≈ 1mV

Si el tamaño del escalón es por cada 1 mV, entonces la conversión del ADC0809 indicará en sus bits de salida:

Por regla de 3 se tiene:

$$X = \frac{255x0.2}{0.250} = 204$$

que en hexadecimal corresponde a CC, por tanto en los bits de salida del ADC se tendrá: *11001100*. Como se puede ver, el solo hecho de disminuir aún más el voltaje de referencia del ADC (cerrar los rangos de medición), a manera de que el dato entregado por el sensor de temperatura (LM35) este más cercano a los límites de medición, mejorará la exactitud, o sea:

 $V_{ref(+)} = 5$  volts  $V_{ref(-)} = 0$  volts Lectura del sensor LM35 = 200 mV (equivalente a  $20^{\circ}$ C) Bits de salida en el ADC en decimal = 10

# Diseño de la interfaz para puerto paralelo

El puerto paralelo de la PC esta formado por 25 pines distribuidos en un conector llamado DB25.

En la Figura II.11 se muestra la forma física del DB25:



Figura II.11. Forma física del conector del puerto paralelo "DB25".

Los pines se agrupan en 3 buses:

Bus de datos = Bus de salida de datos (8 bits)
 Bus de estado = Bus de entrada de datos (5 bits)
 Bus de control = Bus de salida de datos (4 bits)

El resto de los 25 pines se conecta generalmente a tierra. La ubicación de cada bus del DB25 se muestra en la *Figura* II.12



*Figura* II.12. *En esta figura se muestra la posición de los 3 buses, entradas(bus estado), salidas (Bus de control y bus de datos).* 

Debido a que los bits de salida de ADC0809 son 8 y los bits de entrada del puerto paralelo son solo 5, habrá que ver la manera de cómo introducir los 8 bits por 5 bits del puerto. Los buses se muestran en la *Tabla* II.2

|         | Direcciór | n del puert | to hexade | Bits en | DB-25F | Entrada o |
|---------|-----------|-------------|-----------|---------|--------|-----------|
|         | LPT1      | LPT2        | LPT3      | Byte(N) | PIN    | salida    |
| bus de  | 38C       | 378         | 278       | 0       | 2      | salida    |
| datos   |           |             |           | 1       | 3      | salida    |
|         |           |             |           | 2       | 4      | salida    |
|         |           |             |           | 3       | 5      | salida    |
|         |           |             |           | 4       | 6      | salida    |
|         |           |             |           | 5       | 7      | salida    |
|         |           |             |           | 6       | 8      | salida    |
|         |           |             |           | 7       | 9      | salida    |
| bus de  |           |             |           | 0       | NA     |           |
| estado  |           |             |           | 1       | NA     |           |
|         |           |             |           | 2       | NA     |           |
|         |           |             |           | 3       | 15     | entada    |
|         |           |             |           | 4       | 13     | entrada   |
|         |           |             |           | 5       | 12     | entrada   |
|         |           |             |           | 6       | 10     | entrada   |
|         |           |             |           | 7*      | 11     | entrada   |
| bus de  |           |             |           | 0*      | 1      | salida    |
| control |           |             |           | 1*      | 14     | salida    |
|         |           |             |           | 2       | 16     | salida    |
|         |           |             |           | 3       | 17     | salida    |
|         |           |             |           | 4a7     | NA     |           |
|         |           |             |           |         |        |           |
|         |           |             |           |         |        |           |
|         |           |             |           |         |        |           |

**Tabla II.2**. Tabla del orden de los bits de cada bus del  $DB25^{l}$ .

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Los bits en la tabla de la tabla II.2 que tienen un asterisco en la parte superior derecha significa que están invertidos, esto es si se desea sacar el dato 07H por el bus de control, a la salida se tiene un 04H, debido a que 07H en binario es 111 y como los primeros 2 bits menos significativos son invertidos internamente en el CPU de la PC, entonces se tiene en binario un 100, que es equivalente al 04H antes mencionado. Sin embargo hay dos opciones posibles para corregir cualquier bit que se encuentre invertido de cualquier bus.

Una opción es mediante una compuerta inversora externa, por ejemplo un 74LS04, ó mediante programación, es decir, que se invierta el dato usando código en el software que se diseña para la interfaz.

En este caso, la opción fue manejarlo externamente con una compuerta 74LS04 para evitar alguna confusión con las señales de control que serán proporcionadas por el software. La compuerta 74LS04 se explicará más adelante sobre como es su forma física y sus características.

Continuando con la solución para introducir los 8 bits de salida del ADC0809 por el bus de estado, se ha pensado en añadir una etapa de multiplexado. Es decir, que se deje pasar una parte de los 8 bits (la mitad) y luego la otra parte.

De acuerdo a la *Tabla* II.2, en los pines 15, 13, 12, 10 y 11 del DB25 se encuentran los bits del bus de entrada. Se puede ver en la figura 12 que el bit 3 (pin 15) forma parte de los 4 bits menos significativos (o sea la parte baja de un byte). Sin embargo, de acuerdo al siguiente procedimiento, este pin se amarrará a tierra, pues solo se utilizaran los 4 bits más significativos del DB25.

El procedimiento es dejar pasar los 4 bits menos significativos del ADC0809 que físicamente entrarían por los 4 bits más significativos del DB25; posteriormente, habrá que dejar pasar los 4 bits más significativos del ADC0809 y unirlos por programación con los 4 bits menos significativos para que de esta manera se obtenga el byte completo proveniente del ADC0809.

A manera de ejemplo, sobre lo mencionado en el párrafo anterior se tiene que:

|         | Dato obtenido                   | Hex.     |
|---------|---------------------------------|----------|
| ADC0809 | 10011100                        | 9C       |
|         |                                 |          |
|         | Multiplexando la parte baja, se | e tiene: |
|         | 1100                            | С        |
|         | Multiplexando la parte alta, se | e tiene: |
|         | 1001                            | 9        |

En el mercado hay una gran variedad de multiplexores, pero para este proyecto se utilizaran los switches digitales CD4066.

Su forma física se muestra en la Figura II.13



Figura II.13. CD4066 switches digitales.

Sus características son:

- Voltaje de alimentación desde 3V a 15V.
- ▶ Inmunidad al ruido externo de alrededor de 0.45V<sub>DD</sub>.
- Amplio rango de switcheo analógico 4 digital.
- > Impedancia de encendido "ON" que a 15V es de  $80\Omega$ .
- Frecuencia de switcheo de OFF a ON y viceversa de 40 Mhz.

Su tabla de control se muestra en la Tabla II.3.

| ON                                   | 1                         |
|--------------------------------------|---------------------------|
| (pines IN & OUT cerrados ó en corto) | (En terminales CONTROL #) |
| OFF                                  | 0                         |
| (pines IN & OUT abiertos)            | (En terminales CONTROL #) |

# Tabla II.3. Tabla de control.

Debido a que el objetivo es dejar pasar primero 4 bits y luego los otros 4 bits restantes, entonces habrá que conectar al ADC0809 dos circuitos integrados, pero cada uno con la conexión física mostrada en la *Figura* II.14



Figura II.14 Conexión eléctrica del CD4066.

Debido a que se desea que primero entren por el bus de estado del puerto paralelo los primeros 4 bits menos significativos y luego los 4 más significativos, entonces habrá que cuidar el multiplexaje de los switches, tanto los que controlan la parte baja del byte (proveniente de la salida del ADC0809), como los que controlan la parte alta. Esto es porque si los switches de los dos circuitos integrados CD4066 cierran al mismo tiempo, entonces habrá un corto circuito, o sea conflicto entre datos que a su vez provoca que se dañen los integrados. En la *Figura* II.15 se ilustra esto a manera de ejemplo.



*Figura* II.15. En esta figura se muestra lo que sucedería si el pulso de control no es bien configurado.

Para evitar esto habrá que desfasar los pulsos de controla añadiendo un circuito apropiado. Se podría ocupar un inversor lógico como el 74LS04, pero se ha decidido usar un circuito integrado que mediante unas conexiones físicas actúa como si fuese un inversor lógico. Esto se hace porque más adelante se ocupará el mismo integrado para otro arreglo. Este integrado es el 74LS00<sup>2</sup>. Su forma física se muestra en la *Figura* II.16.



Figura II.16. Diagrama eléctrico interno de la compuerta 74LS00.

Sus características son:

- ➢ Su voltaje de alimentación es de +5V
- ➢ Voltaje en 1 lógico es de +3.5V
- Voltaje en 0 lógico es de 250 mV

En la Figura II.17 se muestra la forma física del integrado 74LS04.



Figura II.17. Diagrama eléctrico interno de la compuerta 74LS04.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> : Se ha designado este integrado para el controlar el pulso de cierre de los CD4066. Sin embargo, se ocuparon inversores lógicos para corregir todos los bits invertidos provenientes del puerto paralelo de la PC.

En la *Figura* II.18, se muestra el diagrama eléctrico de la interfaz electrónica y en la *Figura* II.19 el diagrama del circuito impreso.



Figura II.18. Diagrama eléctrico de la interfaz electrónica



Figura II.19. diagrama del circuito impreso.

En la Figura II.20 mostramos la interface construida.



Figura II.20. Conversor análogo-digital

# II.1.3. Programación.

El programa de adquisición de datos, como se planteó en la sección anterior, fue elaborado en VISUAL BASIC.

# Panel frontal.

Esta pantalla es la interfaz con el usuario. En ella pueden colocarse controles numéricos y todo lo que sea necesario para controlar el funcionamiento del instrumento virtual. En la *Figura* II.21 se muestra la pantalla de nuestro programa.



*Figura* II.21 *Vista de la pantalla del ordenador mostrando el panel frontal* 

# Software.

Para el desarrollo del software se hará uso del lenguaje de programación. VISUAL BASIC versión 6.0.

Este es un lenguaje de programación sencillo de usar que permite crear aplicaciones para Windows. Esto se debe a que visual basic dejan crear ventanas que tienen propiedades únicas que las distinguen entre sí, como son: la clase ó tipo, el tamaño, el color, la posición, la ventana a la que pertenece, entre otras.

Visual Basic hace una clara distinción de unas ventanas de otras. Por un lado están las ventanas principales (*formularios*) y por otro lado están los controles y que se incluyen dentro de los formularios. Por ello es posible correr estos programas en Windows.

# Requerimientos del programa

Este programa, ha de asociarse con:

- Una computadora personal (PC) en la cual se realizan todos los comandos y la fijación de la curva de la temperatura según tiempo.
- Un conjunto de sensores de temperatura tipo LM35 que permiten medir la temperatura a diversas profundidades.
- La interfaz (conversor analógico-digital.)

# Organización de los archivos.

Los datos obtenidos con el programa son exportados automáticamente en un archivo de EXEL para que puedan ser importados y procesados con el software que el usuario desee, por ejemplo, como en nuestro caso Microcal ORIGIN [4].

# Descripción del programa.

# Reglas generales del uso.

Los varios menús se muestran en la *Figura* II.21 y pueden ser abiertos con el (ratón) *mouse*. En cada ventana, el *mouse* permite seleccionar los parámetros de la medida, y modificarlos para la selección de los valores, o pulsando con el teclado el valor deseado. Para programar la adquisición de datos, y con ayuda de los iconos correspondientes el usuario debe suministrar al ordenador el intervalo de tiempo (en minutos) entre cada medición de temperatura, el número de mediciones que se deseen realizar, así como el nombre que desee asignarle al fichero de datos en el cual estos serán almacenados, ya sea en el disco duro de la PC o en otro dispositivo. Paralelamente el programa mostrará la fecha y hora reales de la adquisición.

La recuperación del fichero se puede realizar con la ayuda del software "Microcal ORIGIN" mediante la orden de importar datos en formato ascii. La primera columna de la tabla resultante representa el tiempo de adquisición en minutos y las otras son las de la temperatura en grados centígrados en orden ascendente según los canales de entrada de la conexión de la tarjeta de adquisición de datos<sup>3</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Durante la ejecución del programa, es posible abrir otro archivo o programa de la PC o de cualquier directorio sin que la misma se afecte.

# II.2. Procesamiento de datos.

El famoso científico sueco A J Ängström [5] propuso un método en 1861 para medir la difusividad térmica de un sólido en forma de barra (*Figura* II.22). Este método es utilizado todavía con ese objetivo, siendo la base de una técnica mundialmente aceptada como una de las más precisas para medir ese importante parámetro térmico. Se basa también en ecuaciones similares a las de la actual Física de las ondas térmicas. Ängström utilizó como fuente de ondas térmicas en uno de los extremos de la barra un flujo alterno de agua fría y caliente, y medía la temperatura a diferentes distancias de dicha fuente. El experimento que realizaremos se basa en el mismo principio.



**Figura II.22** La medida de la difusividad térmica suele realizarse por el llamado método de Ängström. En él se calienta una barra metálica por un extremo, aplicándole una calefacción periódica, mientras se deja enfriar libremente el otro extremo. La temperatura en un punto dado de la barra realizará oscilaciones periódicas, aproximadamente armónicas, que pueden relacionarse con la difusividad

# II.2.1. Medición de la difusividad térmica mediante ajuste de la data al modelo teórico.

Este método se basa en hacer uso de la ecuación (I.21), que puede ser re-escrita como

$$T(x,t) = \frac{I_o}{2\epsilon\sqrt{\omega}} \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right) \cos\left(\omega t - \frac{x}{\mu} + \frac{\pi}{4}\right) = T_a \cos\left(\omega t - \frac{x}{\mu} + \frac{\pi}{4}\right)$$
(II.1)

y ajustar con su ayuda los datos experimentales (temperatura en función del tiempo) de la siguiente manera. Primeramente los datos correspondientes a la medición realizada en el aire son ajustados mediante

$$T(t) = \Delta T \cos(\omega t) + T_0 \tag{II.2}$$

dejando  $\Delta T$ ,  $T_0$  y  $\omega$  como parámetros de ajuste. Nótese que esta ecuación es similar a la (II.1) para un valor fijo de *x* y suponiendo cero diferencia de fase. El parámetro  $\Delta T$  tiene en cuenta la amplitud de la variación de temperatura alrededor del valor  $T_0$ . Como la variación de la temperatura es aproximadamente sinusoidal, el valor inicial de la frecuencia de modulación para el ajuste debe ser cercano al determinado por el período de la oscilación de temperatura,  $\omega=2\pi/T$ , donde T=24 h.

A continuación, los datos experimentales medidos a diferentes profundidades por debajo de la superficie del suelo deben ser ajustados también a la expresión (II.1), la cual puede escribirse en forma de la función sinusoidal atenuada

$$T(t) = \Delta T e^{-d/\mu} \cos\left(\omega t - d/\mu\right) + T_0$$
(II.3)

donde *d* representa la distancia a la cual se realice la medición de temperatura. Los ajustes son efectuados ahora dejando  $\Delta T$ ,  $T_0$ ,  $\omega$  y  $\mu$  como parámetros de ajuste. A partir de la definición (I.18) y con los valores obtenidos de los dos últimos parámetros puede ser determinada la difusividad térmica del suelo a cada profundidad. Si el suelo es homogéneo entonces estos valores pueden promediarse para calcular el valor final.

# **II.2.2.** Medición de la difusividad térmica usando la atenuación de las ondas térmicas.

Este método consiste en graficar el logaritmo de la diferencia entre máximos y mínimos valores de la temperatura, es decir, las amplitudes de las ondas, en función de la distancia. La amplitud viene dada por el parámetro  $T_a$  que acompaña a la función coseno en la *Ec*. (II.1). Ese gráfico debe ser una línea recta, cuya pendiente es el inverso de la longitud de difusión térmica  $\mu$ , a partir de cuyo valor puede obtenerse el de la

difusividad mediante la expresión (I.18), si el valor de la frecuencia de modulación es conocido. Este puede ser determinado a partir de un ajuste a la expresión (II.2) de la manera descrita arriba.

# II.2.3. Medición de la difusividad térmica a partir del desfasaje de las ondas térmicas.

Esta variante consiste en graficar la profundidad a la cual fue hecha la correspondiente medición en función del tiempo al cual aparece el mínimo de temperatura. La pendiente de la línea recta obtenida puede ser interpretada como la velocidad de fase definida por la *Ec.* (I.20), es decir, la velocidad a la que se desplazan los mínimos (máximos) de las oscilaciones de temperatura. A partir de su valor y con la definición (I.20) puede determinarse el de  $\mu$  y a partir de este el de la difusividad, de la misma manera descrita en el epígrafe anterior.

# Bibliografía del Capítulo.

[1] G. McIntosh and B. S. Sharratt, *The Phys. Teach.*, **39**, 458, 2001.

[2] E Marín, E Jean-Baptiste y M. Hernández, *Revista Mexicana de Física* E52 21, 2006.

[3] National Semiconductor Corp., *Data acquisition Linear* Devices, Edition 1989. *National Instruments Corporation, 11500 N. Mopac Expressway, Austin, TX 78759*; www.ni.com.

- [4] http//www.microcal.com
- [5] A. J. Ångström Ann. Physik. Lpz. 114, 513, 1861.

# Capítulo III. Resultados y discusión

# III.1. Calibración del sistema experimental.

La *Figura* III.1 muestra cuatro curvas de temperatura en función del tiempo, medidas simultáneamente en el Laboratorio de Física Aplicada de CICATA-Legaria<sup>4</sup> entre los días 1 y 2 de Diciembre de 2006 (las correspondientes a los otros sensores son similares y se omiten por razones de visualización). La humedad relativa era de %. Los cuatro sensores se encontraban situados en el aire, fuera de la sonda de medición, a una distancia de aproximadamente 10cm del suelo. Los valores de temperatura fueron normalizados dividiendo cada uno por el máximo de cada data experimental por motivos de comparación. Las curvas continuas representan el mejor ajuste mediante el método de mínimos cuadrados de los datos a la *Ec*. II.2, dejando como parámetros de ajuste  $\Delta T$ ,  $T_0$  y  $\omega$ , cuyos valores se muestran en la *Tabla* III.1, conjuntamente con los errores aleatorios. Todos los ajustes fueron utilizados los estimados visualmente en los gráficos.



**Figura III.1** Temperatura normalizada en función del tiempo medidas simultáneamente en aire en el Laboratorio de Física Aplicada de CICATA-Legaria entre los días 1 y 2 de Diciembre de 2006 Las curvas continuas representan el mejor ajuste de los datos a la Ec. II.2, dejando como parámetros de ajuste  $\Delta T$ ,  $T_0$  y  $\omega$ . 0 hrs. corresponde a 13:30 hrs.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, legaria 694, Col. irrigación, CP. 11500, México D.F., México.

| Sensor          | ΔΤ              | T <sub>0</sub>  | $\omega (h^{-1})$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| 1 (curva negra) | $0.043\pm0.002$ | $0.940\pm0.001$ | $0.319\pm0.003$   |
| 2 (curva roja)  | $0.041\pm0.002$ | $0.949\pm0.001$ | $0.320\pm0.003$   |
| 3 (curva azul)  | $0.042\pm0.002$ | $0.940\pm0.001$ | $0.321\pm0.003$   |
| 4 (curva verde) | $0.044\pm0.002$ | $0.937\pm0.001$ | $0.323\pm0.003$   |

 Tabla III.1 Parámetros de ajuste correspondientes a las curvas continuas mostradas en la

 Figura III.1.

Observando los resultados de los ajustes puede observarse que los resultados obtenidos con todos los sensores son iguales teniendo en cuenta los errores experimentales. De estos resultados merece discutir el obtenido para la frecuencia de modulación. Promediando los cuatro valores obtenidos de acuerdo a cada sensor obtenemos  $\omega = (0.321 \pm 0.004)$  h<sup>-1</sup>. Aunque las oscilaciones de la temperatura son aproximadamente sinusoidales existen obvias diferencias respecto de este comportamiento. A partir del valor de la frecuencia se puede calcular el período de las oscilaciones de la temperatura, es decir,  $T=2\pi/\omega=(19.6\pm0.2)h$ . La diferencia con respecto al valor esperado de aproximadamente 24 h se debe a las desviaciones de la fuente de calor del comportamiento armónico supuesto en nuestro modelo. Sin embargo, debido a lo pequeño de los errores de los ajustes nuestro resultado puede considerarse satisfactorio y el modelo válido para describir la propagación de las ondas de temperatura en suelos. Hay que resaltar que la amplitud de las oscilaciones de temperatura obtenidas (véanse los valores de  $\Delta T$  en la Tabla III.1) fueron muy pequeñas comparadas con reportes previos de mediciones similares efectuadas al aire libre [2] debido a que las variaciones de temperatura dentro del laboratorio no son tan bruscas como en su exterior. Sin embargo, el mayor objetivo de estas mediciones fue calibrar nuestro sistema experimental, con el cual fueron obtenidos resultados similares en otros momentos, lo que demuestra la reproducibilidad de los experimentos. Por lo tanto podemos concluir que cualquier medición posterior que realicemos con esos sensores será confiable y reproducible.

Por otra parte, la *Figura* III.2 muestra el ajuste de una de las curvas experimentales anteriores a la expresión (II.2), dejando además de  $\Delta T$ ,  $T_0$  y  $\omega$  a  $d/\mu$  como parámetro de ajuste. Los valores correspondientes se muestran en la *Tabla* III.2.



**Figura. III.2.** Temperatura normalizada en función del tiempo para uno de los sensores. La curva continua es el mejor ajuste con la Ec. (II.2) con  $\Delta T$ ,  $T_0$ ,  $\omega y d/\mu$  como parámetros de ajuste.0 hrs. corresponde a 14:30hrs.

| ΔΤ                | T <sub>0</sub>  | ω (h <sup>-1</sup> ) | d/µ           |
|-------------------|-----------------|----------------------|---------------|
| $0.044 \pm 0.001$ | $0.941\pm0.001$ | $0.306\pm0.007$      | $0.17\pm0.09$ |

 Tabla III.2. Parámetros de ajuste correspondientes al ajuste con la Ec. II.2 de los datos señalizados en color negro en la Figura III.1.

A partir del valor obtenido para  $d/\mu$ , considerando que la difusividad térmica del aire tiene el valor  $\alpha$ =0.24cm<sup>2</sup>/s [3] y utilizando el valor de  $\omega$  hallado en el ajuste, podemos despejar el valor del parámetro d que caracteriza la distancia del suelo a la que se encuentran los sensores. El calculo arroja el valor d=(12.7±0.1)cm, en concordancia con el diseño experimental.

# III. 2. Experimentos en suelos.

# III.2.1. Montaje experimental.

Para la realización de los experimentos primeramente seleccionamos un suelo de composición y tamaño de partículas homogéneos para garantizar la constancia de propiedades térmicas implícita en el modelo teórico. Para ello se escogió arena sílica y el tamaño de grano se garantizó cerniéndola con un tamiz de abertura de 0.167cm. Para mantener valores constantes del contenido de humedad, la muestra a analizar fue secada y mantenida bajo techo en un ambiente de humedad controlada durante unos 3 meses. A continuación fue colocada en una caja especialmente diseñada con dimensiones de 80cm de altura, y una base cuadrada de 40cm por lado, que fue llenada hasta una altura de unos 60cm. La misma fue colocada entonces a la intemperie en el patio de las instalaciones de CICATA. La sonda de medición fue introducida cerca del centro de la caja alejada al máximo de sus paredes, y la señal proveniente de los sensores llevada a través de cables de unos 15m de largo, trenzados y blindados convenientemente para evitar efectos capacitivos e inductivos parásitos, hasta la interfaz, conectada a una computadora personal que se encontraba en un local aledaño. La *Figura* III.3 muestra una fotografía del sistema de medición descrito.



Figura III.3. Fotografia del montaje experimental.

# **III.2.2.** Resultados experimentales.

## III.2.2.1. Método del ajuste.

La *Figura* III.4 muestra la temperatura en función del tiempo medida con el sensor ubicado en el aire, a una distancia de 5cm del suelo. La curva continua representa el mejor ajuste mediante el método de mínimos cuadrados de los datos a la *Ec*. II.2, dejando como parámetros de ajuste  $\Delta T$ ,  $T_0$  y  $\omega$ , cuyos valores se muestran en la *Tabla* III.2.



*Figura* III.4. *Temperatura en función del tiempo medida en aire el 20 y 21 de Diciembre de 2006 Las curvas continuas representan el mejor ajuste de los datos a la Ec. II.2, dejando como parámetros de ajuste*  $\Delta T$ ,  $T_0 y \omega$ .

|        | ΔT (°C)       | T <sub>0</sub> (°C) | ω (h <sup>-1</sup> ) | d/µ          |
|--------|---------------|---------------------|----------------------|--------------|
| Dia 20 | $0.37\pm0.08$ | $11.1 \pm 0.5$      | $0.307\pm0.006$      | $16.1\pm0.4$ |
| Dia 21 | $0.48\pm0.08$ | $11.4\pm0.6$        | $0.322\pm0.006$      | $17.2\pm0.4$ |

 Tabla III.3 Parámetros de ajuste correspondientes a las curvas continuas mostradas en la

 Figura III.5.

La *Figura* III.5 muestra la temperatura en función del tiempo a diferentes profundidades. Las curvas continuas representan el mejor ajuste mediante el método de mínimos cuadrados de los datos a la *Ec*. II.3, dejando como parámetros de ajuste  $\Delta T$ ,  $T_0$ ,  $\omega$  y  $d/\mu$ , cuyos valores se muestran en la *Tabla* III.4. Como valor inicial de la frecuencia utilizado en los ajustes fue utilizado el medido en el aire.



*Figura* III.5. *Temperatura en función del tiempo medida a diferentes profundidades los días*19 y 20 de Diciembre de 2006 Las curvas continuas representan el mejor ajuste de los datos a la Ec. II.3, dejando como parámetros de ajuste  $\Delta T$ ,  $T_0$ ,  $\omega y d/\mu$ .

| Cm | ΔT (°C)        | $T_0(^{\circ}C)$ | $\omega (\mathbf{h}^{-1})$ | d/µ           | $\alpha$ (cm <sup>2</sup> /s) |
|----|----------------|------------------|----------------------------|---------------|-------------------------------|
| 30 | $15.46\pm0.01$ | $0.81\pm0.01$    | $0.266\pm0.003$            | $3.25\pm0.04$ | $0.0031 \pm 0.0001$           |
| 25 | $14.91\pm0.01$ | $0.91\pm0.02$    | $0.260 \pm 0.003$          | $2.94\pm0.04$ | $0.0026 \pm 0.0002$           |
| 20 | $15.06\pm0.02$ | $1.04\pm0.02$    | $0.275 \pm 0.003$          | $2.57\pm0.05$ | $0.0023 \pm 0.0001$           |
| 15 | $15.01\pm0.03$ | $1.30\pm0.03$    | $0.309\pm0.006$            | $2.25\pm0.07$ | $0.0019 \pm 0.0001$           |
| 10 | $14.99\pm0.07$ | $2.64\pm0.07$    | $0.290 \pm 0.007$          | $1.20\pm0.07$ | $0.0027 \pm 0.0002$           |
| 5  | $14.8\pm0.1$   | $5.8 \pm 0.2$    | $0.296\pm0.005$            | $0.71\pm0.06$ | $0.0020 \pm 0.0003$           |

 Tabla III.4. Parámetros de ajuste correspondientes a las curvas continuas mostradas en la

 Figura. III.5. y valores de difusividad térmica medidos a cada profundidad.

A partir de los valores de  $d/\mu$  fue calculado el de  $\mu$  utilizando en cada caso el correspondiente de d. Usando los correspondientes valores de  $\omega$  y la definición (I.18) se despejó en cada caso el valor de la difusividad térmica,  $\alpha = \omega \mu^2/2$ . Estos resultados se muestran también en la *Tabla* III.4. El valor promedio de la difusividad térmica es de $\alpha$ =(2.4±0.2)×10<sup>-3</sup>cm<sup>2</sup>/s, el cual coincide con el reportado en la literatura para suelos similares al estudiado [4].

# III.2.2.2. Método de la atenuación.

En la *Figura* III.6 se muestra el logaritmo de las amplitudes de las oscilaciones en función de la profundidad. A partir de la pendiente y siguiendo la metodología descrita en la sección II.2.2 obtuvimos para la longitud de difusión térmica el valor de  $\mu$ =(7.24±0.02)cm.



Figura III.6. Atenuación.

#### III.2.2.3. Método del desfasaje.

En la *Figura* III.7 se muestra la relación entre el tiempo al cual aparecen los valores mínimos de temperatura y la profundidad a la cual se hicieron las mediciones. Del ajuste lineal de los datos se obtuvo para la pendiente el valor de la velocidad de fase

 $v_f = (1.99 \pm 0.07)$  cm/h, a partir del cual calculamos, usando la *Ec.* (I.20) y la frecuecia obtenida antes,  $\alpha = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s.



Figura III.7. Desfasaje.

Para comparar, los valores de difusividad térmica determinados mediante los tres métodos propuestos se muestran en la *Tabla* III.5. Podemos observar la buena congruencia entre ellos teniendo en cuenta el margen de error experimental. Sin embargo, en nuestra opinión los métodos de atenuación y desfasaje son más precisos que el del ajuste ya que sus resultados provienen del análisis de una apropiada cantidad de puntos experimentales en métodos gráficos de procesamiento que reducen los errores aleatorios y por tanto la desviación estándar de las mediciones. Estos métodos permiten también visualizar de una manera más cuantitativa las principales características de la propagación del calor en suelos, como son la atenuación y el desfasaje con la profundidad de las oscilaciones en su temperatura.

|  | Ajuste    | Atenuaciòn    | Defasaje      |
|--|-----------|---------------|---------------|
| Difusividad Tèrmica<br>$\times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{s})$ | 2.4 ± 0.2 | $2.0 \pm 0.3$ | $1.9 \pm 0.2$ |

Tabla III.5. Valores obtenidos de la difusividad térmica mediante los tres métodos.

Por otra parte, un análisis minucioso de las *Figuras* III.4 y III.5, muestran que si bien las curvas T Vs t medidas a mayores profundidades tienen un comportamiento cercano al sinusoidal, evidentes desviaciones son observadas en aquellas realizadas en el aire y cerca de la superficie. Teniendo en cuenta que estas diferencias pueden deberse a fluctuaciones aleatorias en la temperatura del aire, efectos de convección forzada debida a corrientes de aire y a la simetría del depósito de arena, entre otras<sup>5</sup>, decidimos realizar mediciones en un sistema real como lo es el suelo del jardín de patio de las instalaciones del CICATA (*Figura* III.8).



Figura III.8. Sistema real, suelo del jardín, CICATA.

La *figura* III.9 muestra la temperatura en función del tiempo a diferentes profundidades. Las curvas continuas representan el mejor ajuste mediante el método de mínimos cuadrados de los datos a la *Ec.* II.3, dejando como parámetros de ajuste  $\Delta T$ ,  $T_0$ ,  $\omega y d/\mu$ , cuyos valores se muestran en la *Tabla* III.6. Como valor inicial de la frecuencia utilizado en los ajustes fue utilizado el medido en el aire.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Es importante comentar en este punto que estos resultados recuerdan a los reportados por [5], quienes aseveran que las dependencias T Vs t no siguen un comportamiento sinusoidal, sino lineal durante el día y parabólico de noche. Esas mediciones cabe mencionar que fueron realizadas en el aire, por lo que el comportamiento mostrado debe de ser debidas a las causas mencionadas arriba.



**Figura III.9.** Temperatura en función del tiempo medida a diferentes profundidades los días19 y 20 de Diciembre de 2006 Las curvas continuas representan el mejor ajuste de los datos a la Ec. II.3, dejando como parámetros de ajuste  $\Delta T$ ,  $T_0$ ,  $\omega y d/\mu$ .

| Cm | ΔT (°C)            | T <sub>0</sub> (°C) | ω (h <sup>-1</sup> ) | d/µ             | $\alpha$ (cm <sup>2</sup> /s) |
|----|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|
| 30 | $13.451 \pm 0.007$ | $0.06 \pm 0.01$     | $0.409\pm0.02$       | $4.9\pm0.3$     | $0.0021 \pm 0.0002$           |
| 25 | $12.71\pm0.01$     | $0.21\pm0.01$       | $0.327\pm0.01$       | $2.8\pm0.2$     | $0.0036 \pm 0.0004$           |
| 20 | $12.75\pm0.02$     | $0.39\pm0.01$       | $0.222\pm0.009$      | $0.8\pm0.1$     | $0.019 \pm 0.0001$            |
| 15 | $12.93\pm0.01$     | $0.79\pm0.02$       | $0.248\pm0.004$      | $0.51\pm0.05$   | $0.013 \pm 0.0001$            |
| 10 | $12.68 \pm 0.04$   | $1.65 \pm 0.06$     | $0.249 \pm 0.006$    | $0.06 \pm 0.09$ | $0.0026 \pm 0.0002$           |
| 5  | $12.4 \pm 0.1$     | 3.4 ± 0.2           | $0.252 \pm 0.007$    | $0.59 \pm 0.1$  | $0.0024 \pm 0.0001$           |

 Tabla III.6. Parámetros de ajuste correspondientes a las curvas continuas mostradas en la

 Figura. III.9. y valores de difusividad térmica medidos a cada profundidad.

A partir de los valores de  $d/\mu$  fue calculado el de  $\mu$  utilizando en cada caso el correspondiente de d. Usando los correspondientes valores de  $\omega$  y la definición (I.18) se despejó en cada caso el valor de la difusividad térmica,  $\alpha = \omega \mu^2/2$ . Estos resultados se muestran también en la *tabla* III.6. El valor promedio de la difusividad térmica es de $\alpha$ =(2.6±0.3)×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/s, que de igual manera coincide con el reportado en la literatura para suelos similares al estudiado [4].

# III.2.2.2. Método de la atenuación.

En la *Figura* III.10 se muestra el logaritmo de las amplitudes de las oscilaciones en función de la profundidad. A partir de la pendiente y siguiendo la metodología descrita en la sección II.2.2 obtuvimos para la longitud de difusión térmica el valor de  $\mu$ =(7.14±0.04)cm,



Figura III.10. Atenuación.

# III.2.2.3. Método del desfasaje.

En la *Figura* III.11 se muestra la relación entre el tiempo al cual aparecen los valores mínimos de temperatura y la profundidad a la cual se hicieron las mediciones. Del ajuste lineal de los datos se obtuvo para la pendiente el valor de la velocidad de fase

 $v_f = (1.84 \pm 0.06) \text{ cm/h}$ , a partir del cual calculamos, usando la *Ec.* (I.20) y la frecuecia obtenida antes,  $\alpha = (1.8 \pm 0.2) \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ .



Figura III.11. Desfasaje.

Para comparar, los valores de difusividad térmica determinados mediante los tres métodos propuestos se muestran en la *Tabla* III.7.

|                             | Ajuste      | Atenuaciòn  | Defasaje      |
|-----------------------------|-------------|-------------|---------------|
| Difusividad Tèrmica         | $2.6\pm0.3$ | $1.8\pm0.1$ | $1.8 \pm 0.2$ |
| $\times 10^{-3} (cm^{2}/s)$ |             |             |               |

Tabla III.7. Valores obtenidos de la difusividad térmica mediante los tres métodos.

# Bibliografía del Capítulo.

[1] http//www.microcal.com

[2] E Marín, E Jean-Baptiste y M Hernández, *Revista Mexicana de Física* E52, 21, 2006.

[3] J.A.P. Lima, E. Marín, S. L. Cardoso, D. Takeuty, M.G. da Silva, M.S. Sthel, C.E.
Rezende, C. N. Gatts, H. Vargas y L.C.M. Miranda. *Rev. Of Scientific Instruments* 71, 2928, 2000.

[4] E. Boeker y R. van Grondelle, *Eenviromental Physics*, 2da Ed. John Wiley and Sons, 2004

[5] L. Veleva, G. Pérez y M. Acosta, atmospheric Enviroment, 31, 773, 1997.

# Conclusiones.

- 1. Se diseñó y construyó un dispositivo electrónico para medir las oscilaciones de temperatura que tienen lugar en el suelo a diferentes profundidades.
- Utilizando un modelo teórico basado en la física de ondas térmicas se determinó la difusividad térmica del suelo a partir de datos experimentales de temperatura en función del tiempo medidos a diferentes profundidades por debajo de la superficie del suelo.
- 3. Se propusieron tres metodologías para el procesamiento de la data experimental y se compararon entre si teniendo en cuenta los errores experimentales, concluyéndose que aquellas basadas en el análisis de la atenuación y el desfasaje de las ondas térmicas ofrecen ventajas comparadas con el que utiliza el ajuste de la data al modelo teórico, utilizado comúnmente.
## Recomendaciones.

- *1.* Modificar el sistema experimental utilizando un microprocesador para mediciones remotas e *in-situ*.
- 2. Tener en cuenta en el modelo teórico la no homogeneidad del suelo.
- 3. Perfeccionar la metodología de trabajo para la determinación de otras propiedades térmicas *in-situ*, como la efusividad y conductividad térmicas.
- 4. Hacer modelos estadísticos para evaluar la validez del modelo presentado.