

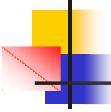
# ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE AIRE MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Leila Mora Iannelli

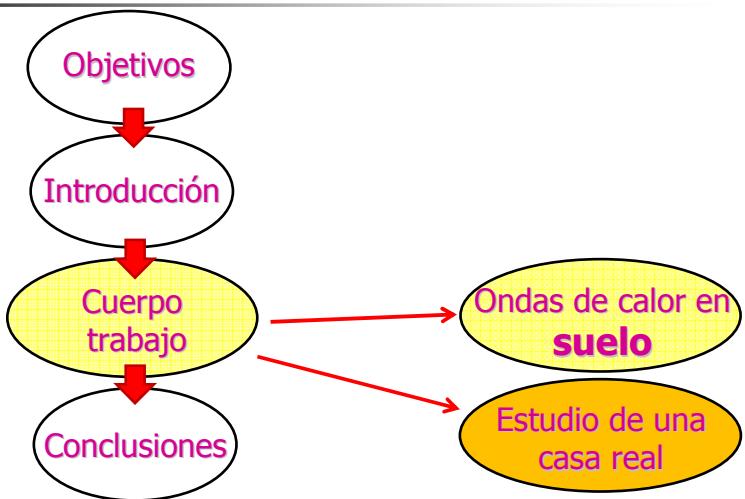
Salvador Gil

**HYFUSEN 2013**

5to. Congreso Nacional - 4to. Congreso Iberoamericano  
HIDRÓGENO Y FUENTES SUSTENTABLES DE ENERGÍA  
Córdoba, Argentina, 10 - 14 de junio de 2013



## Esquema de la presentación

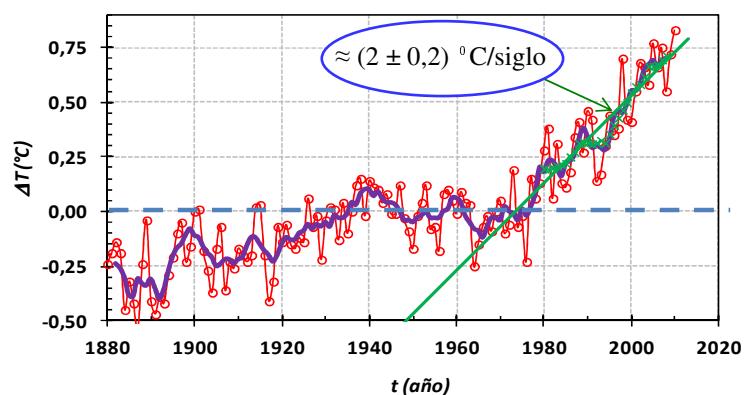


## Objetivos

- Estudios experimentales: **suelo**
- Modelo térmico del suelo Buenos Aires  $T(z, t)$
- Tubos enterrados
- Modelo de intercambio de calor suelo - aire
- Validación de modelo y aplicación a un caso real
- ***Potencialidad energética – La Tierra como acondicionador natural de ambientes***

3

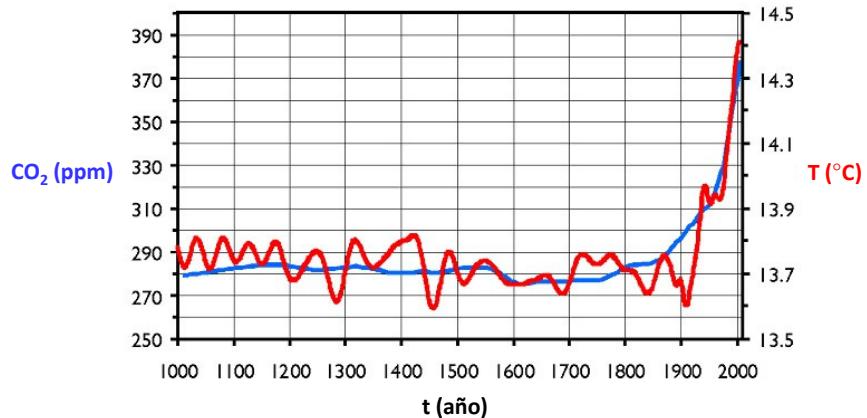
## Incremento de las temperaturas medias globales de la Tierra y los Océanos entre 1880-2010



Referencia: NASA, Goddard Institute for Space Studies (GISS).

4

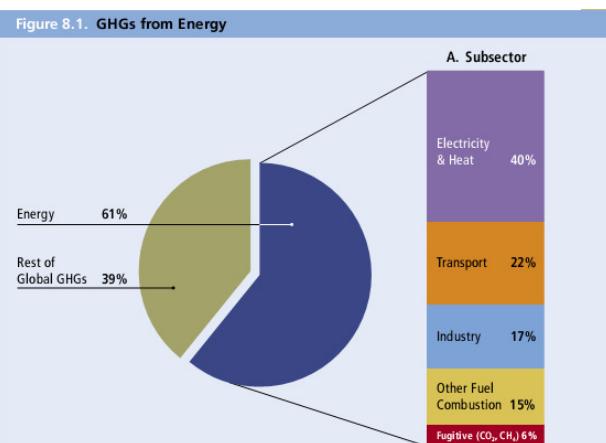
## Temperaturas globales y contenido de CO<sub>2</sub>



Referencia: National Oceanic & Atmospheric Administration, NOAA, USA.

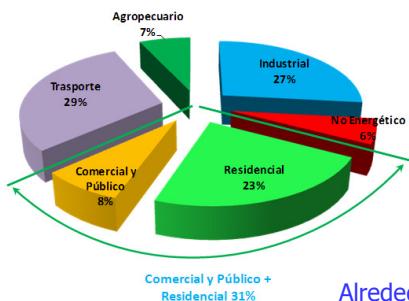
5

## GEI - Contribuciones



6

## Usos de la energía en Argentina

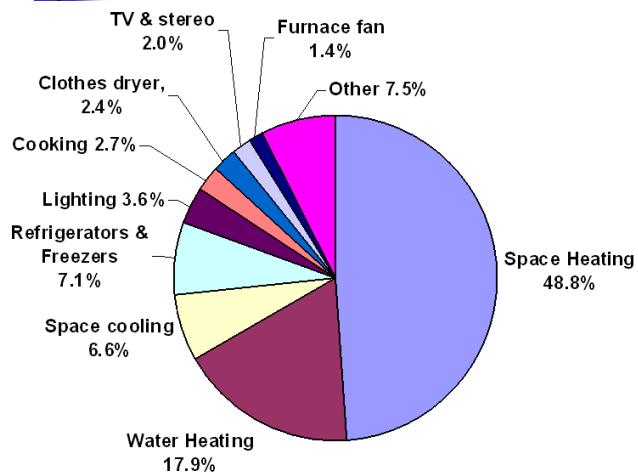


Alrededor del 58% de la energía de uso residencial, comercial y público o sea el 18% del total se usa en calefacción o aire acondicionado.

Referencia: Secretaría de Energía de la Nación (2010), <http://energia3.mecon.gov.ar>.

7

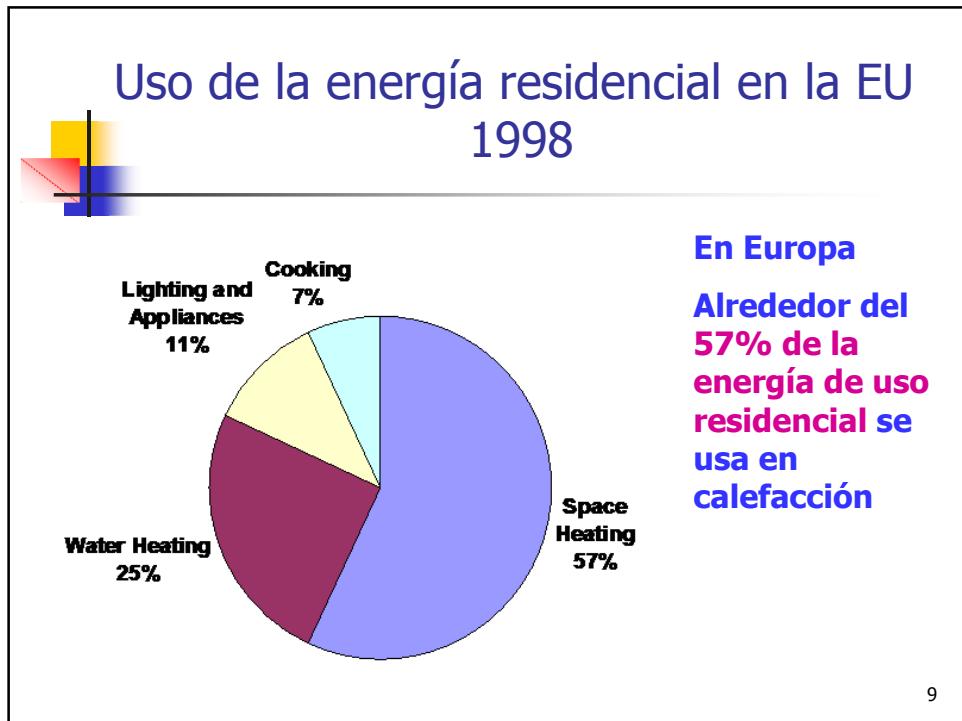
## Uso de la energía residencial en EE.UU. 2001



En EE.UU.

Alrededor del 50% de la energía de uso residencial se usa en calefacción

8

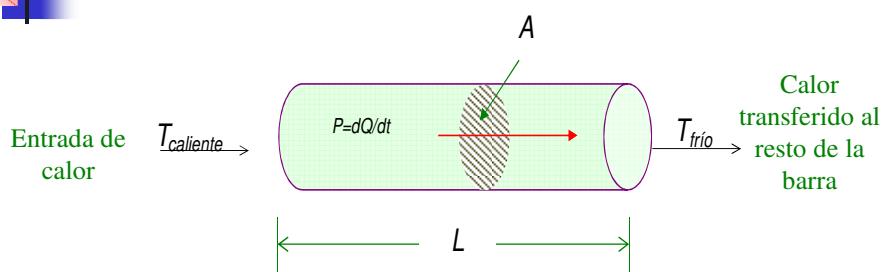


## Cuerpo del trabajo

- ✓ Estudio teórico-experimental de **ondas de calor**
- ✓ suelo
- ✓ Modelo de intercambio de calor suelo-aire en tubos enterrados
- ✓ Verificación con un *sistema real* de tubos enterrados

11

## Conducción - Ley de Fourier



$$P = \frac{dQ}{dt} = \text{Potencia transmitida}$$

$A$  = Área transversal al eje de la muestra

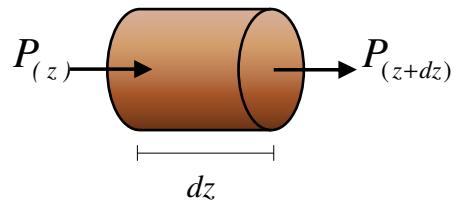
$K$  = Constante de conductividad

$$P = \frac{dQ}{dt} = -K \cdot A \frac{dT}{dz}$$

$$\frac{dT}{dz} = \text{Gradiente térmico (diferencia de temperatura/espesor)}$$

12

## Ecuación de difusión del calor $T(z,t)$



$$\delta Q = \delta m \cdot c \cdot dT$$

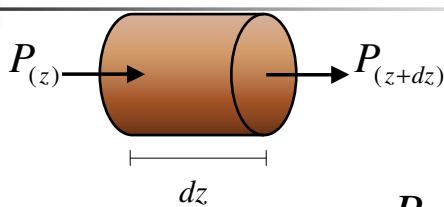
$$\frac{dQ}{dt} = -K \cdot A \frac{dT}{dz}$$

Difusividad  $k = K/\rho \cdot c$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

13

## Ley de Fourier – Ecuación del Calor



$$P(z) = -KA \left( \frac{dT}{dz} \right)_z$$

$$P(z+dz) = -KA \left( \frac{dT}{dz} \right)_{z+dz}$$

$$\begin{aligned} \delta m &= \nu \rho \\ \delta m &= A dz \cdot \rho \end{aligned}$$

$$P = \frac{dQ}{dt} = A dz \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$

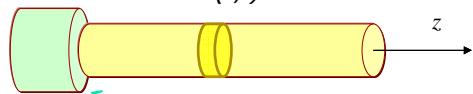
Difusividad  
 $k = K/\rho \cdot c$

$$-KA \left[ \left( \frac{dT}{dz} \right)_{z+dz} - \left( \frac{dT}{dz} \right)_z \right] = A dz \cdot \rho \frac{dT}{dt} \rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

14

## Ondas de calor en 1D

$T(z,t)$  Barra aislada térmicamente



Si:  $T(z = 0, t) = T_{00} + A_0 \cos\left(\frac{2\pi}{p_0} \cdot t + \phi_0\right)$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T(z,t) = T_{00} + A_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu_0}\right) \cos\left(\frac{1}{\mu_0}(z \pm v_0 t + \phi_0)\right)$$

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{p_0 \cdot k}{\pi}}$$

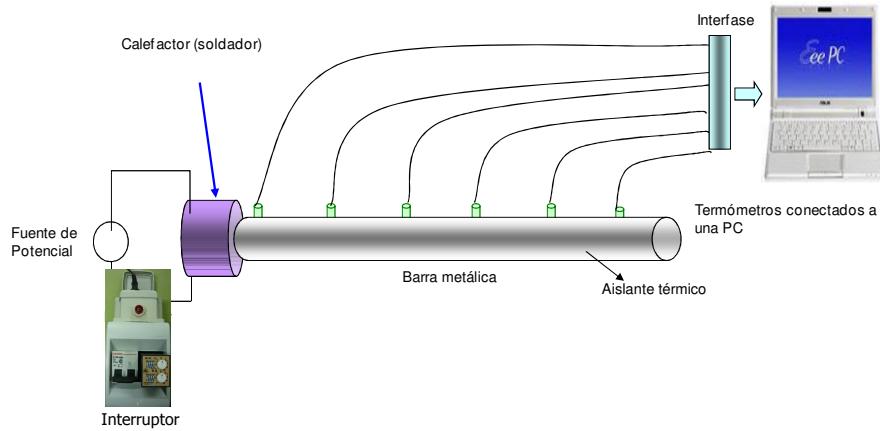
$$v_0 = \sqrt{\frac{4\pi \cdot k}{p_0}}$$

15

Estudio de Ondas de Calor en una  
Barra de Cobre

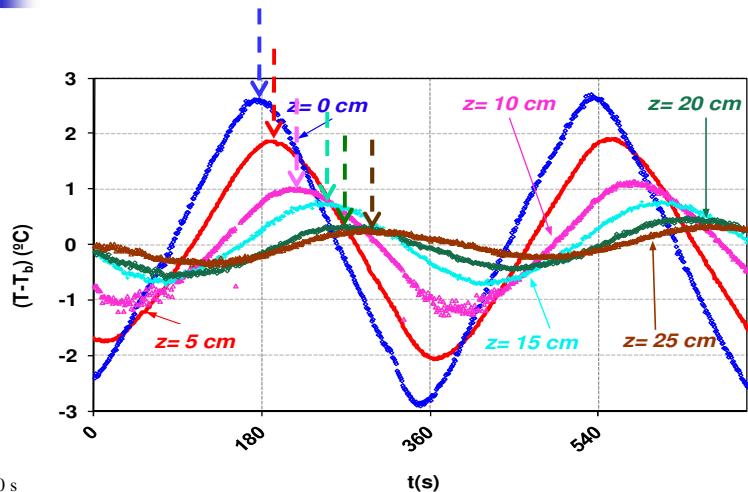
16

## Arreglo experimental: Barra de Cobre



17

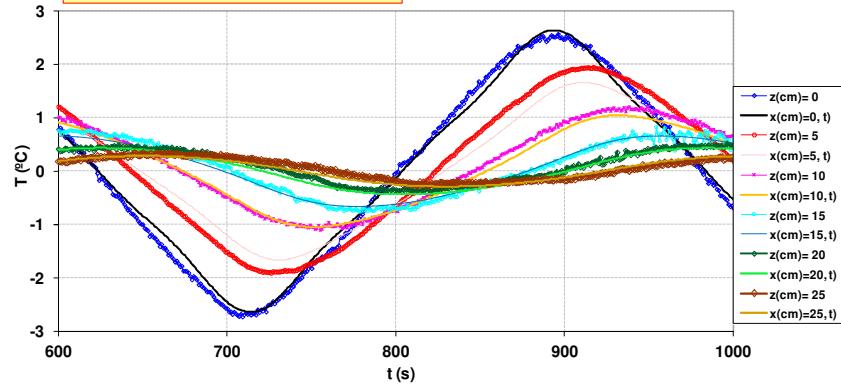
## Resultados experimentales en barra de cobre



18

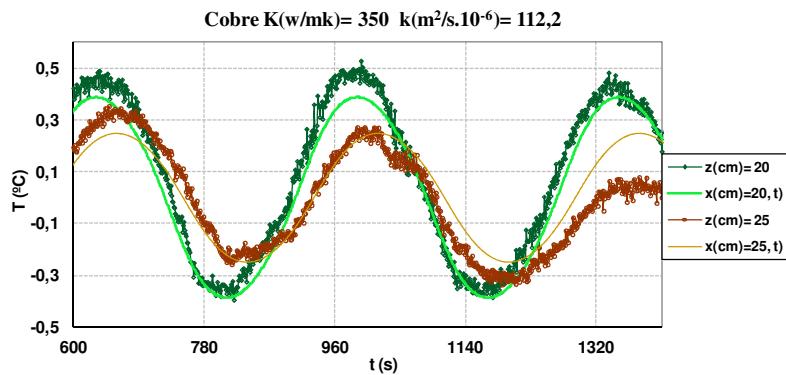
## Método Ajuste (datos medidos - expresión teórica)

$$T(z, t) = T_{00} + A_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu_0}\right) \cos\left(\frac{1}{\mu_0}(z \pm v_0 t + \phi_0)\right)$$



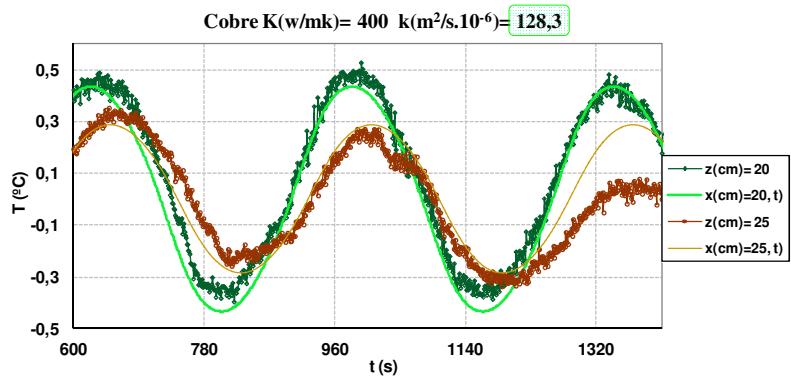
19

## Análisis del ajuste de datos al modelo



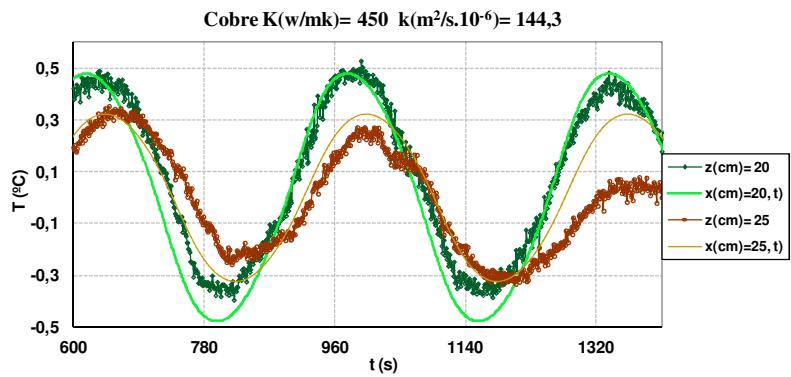
20

## Análisis del ajuste de datos al modelo



21

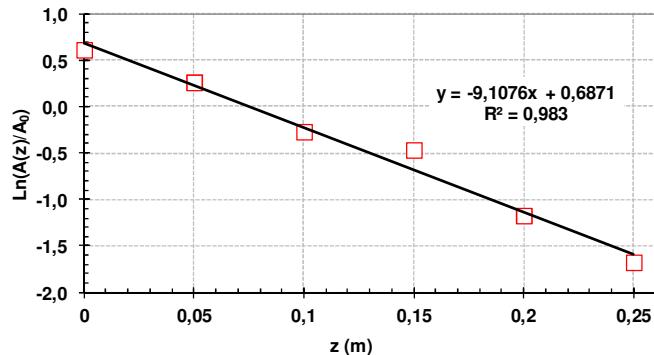
## Análisis del ajuste de datos al modelo



22

## Método de Atenuación

Análisis de la variación de amplitud de la señal con la profundidad



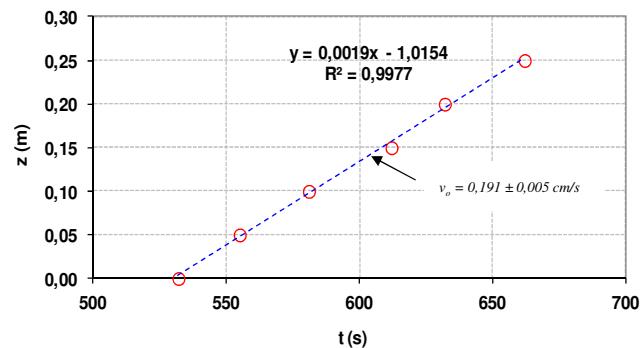
$$pendiente = -\frac{1}{\mu_0}$$

$$k = \frac{\pi \mu_0^2}{p_0}$$

23

## Método de Desfasaje

Análisis del desfasaje de la señal con la profundidad



$$pendiente = v_0$$

$$k = \frac{v_0^2 \cdot p_0}{4\pi}$$

24

## Resultados obtenidos (Cu)

Coeficiente de difusividad térmica ( $k$ )	Experimental ( $m^2/s \times 10^{-6}$ )	Tabulado Cu puro ( $m^2/s \times 10^{-6}$ )
Método de Ajuste	$128 \pm 13$	
Método de Atenuación	$105 \pm 2$	113
Método de Desfasaje	$105 \pm 3$	
<b>Mejor valor de <math>k</math></b>	<b><math>106 \pm 2</math></b>	<b><math>113 (\approx 107)</math></b>

25

## Conclusiones Parciales

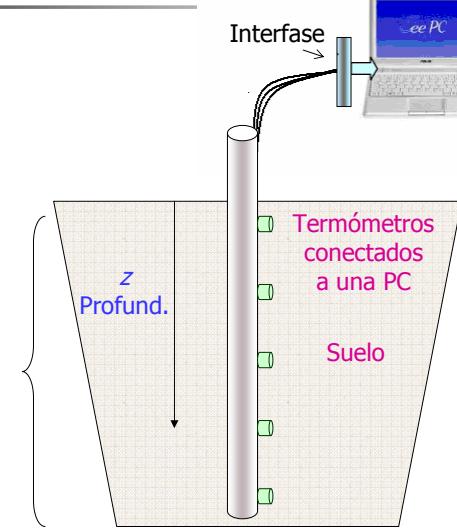
- El comportamiento cualitativo es bien descripto por el modelo (atenuación y desfasaje).
- Se observa que el modelo reproduce bien los datos medidos.
- Los  $k$  (difusividad) obtenidos con los tres métodos son consistentes con el valor tabulado.

26

## Estudio de Ondas de Calor en el Suelo

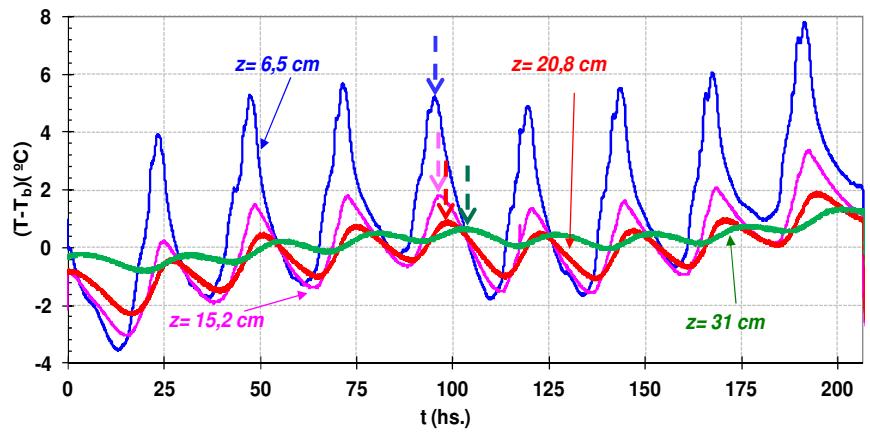
27

### Arreglo experimental: Propiedades térmicas del suelo (Bs. As.)



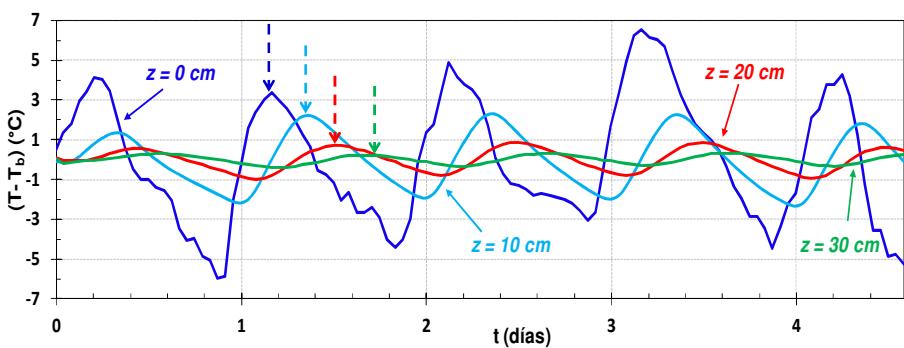
28

## Resultados experimentales UNSAM



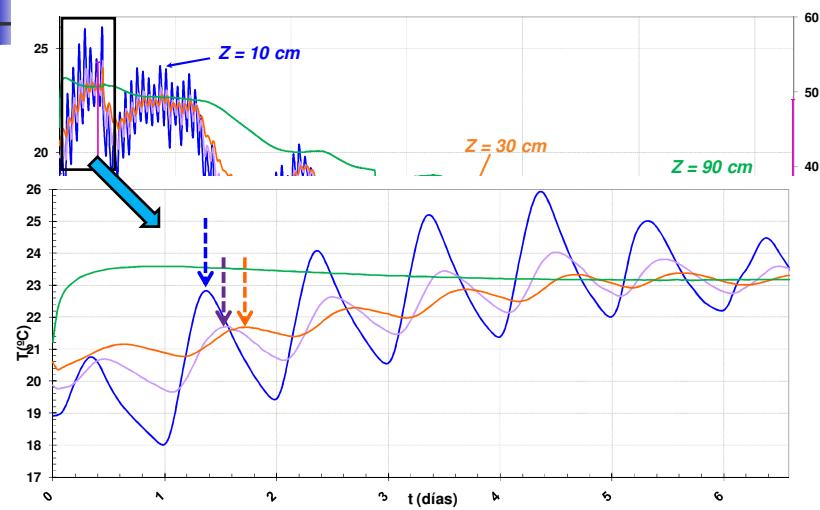
29

## Resultados experimentales INTI



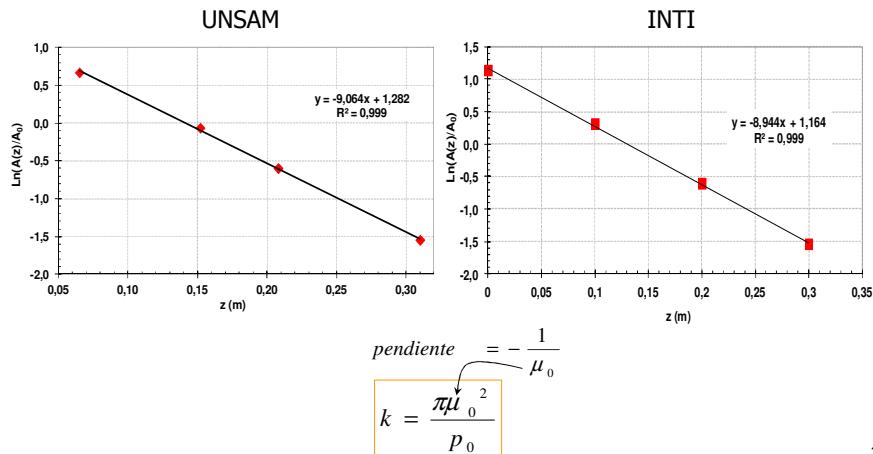
30

## Ondas de Calor del Suelo Resultados experimentales



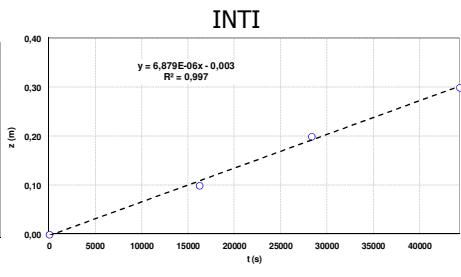
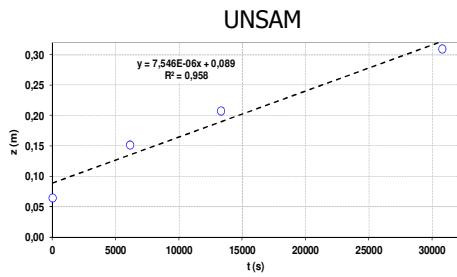
31

## Método de Atenuación



32

## Método de Desfasaje



pendiente  $= -v_0$

$$k = \frac{v_0^2 \cdot p_0}{4\pi}$$

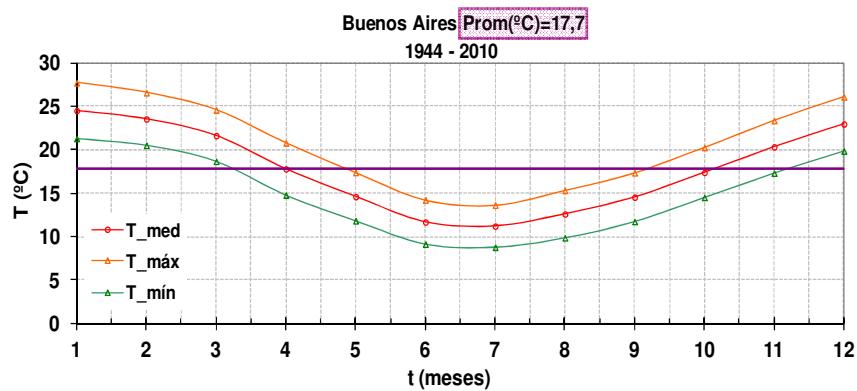
33

## Resultados obtenidos

Coeficiente de difusividad térmica ( $k$ )	Experimental ( $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$ )		Tabulado ( $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$ )	
	UNSAM	INTI	Arcilla	Arena
Método de atenuación	$0,44 \pm 0,03$	$0,45 \pm 0,04$		
Método de desfasaje	$0,4 \pm 0,1$	$0,33 \pm 0,04$	$0,26 - 0,4$	$0,296 - 0,521$
<b>Mejor valor de <math>k</math></b>	<b><math>0,44 \pm 0,03</math></b>	<b><math>0,39 \pm 0,06</math></b>	<b><math>0,26 - 0,4</math></b>	<b><math>0,296 - 0,521</math></b>

34

## Temperaturas de Buenos Aires Ciclo Anual

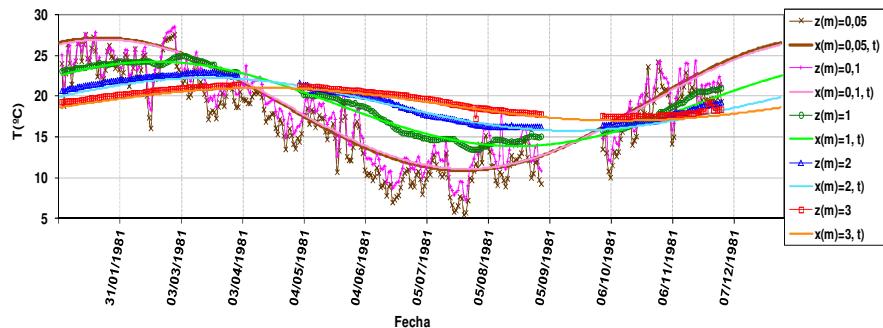


Referencia: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

35

## Método de Ajuste. SMN

$$T(z, t) = T_{00} + A_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu_0}\right) \cos\left(\frac{1}{\mu_0}(z \pm v_0 t + \phi_0)\right)$$

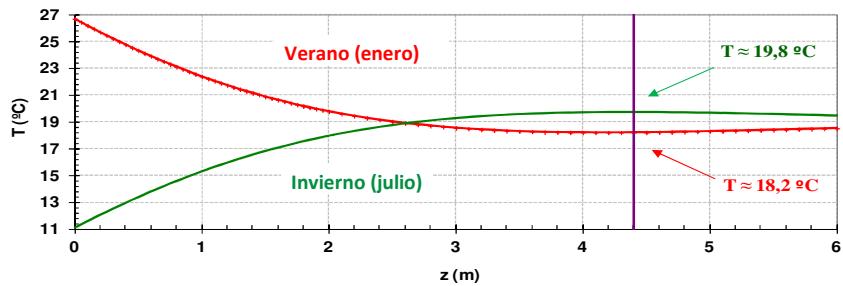


Referencia: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

36

## Temperaturas Tierra - Buenos Aires

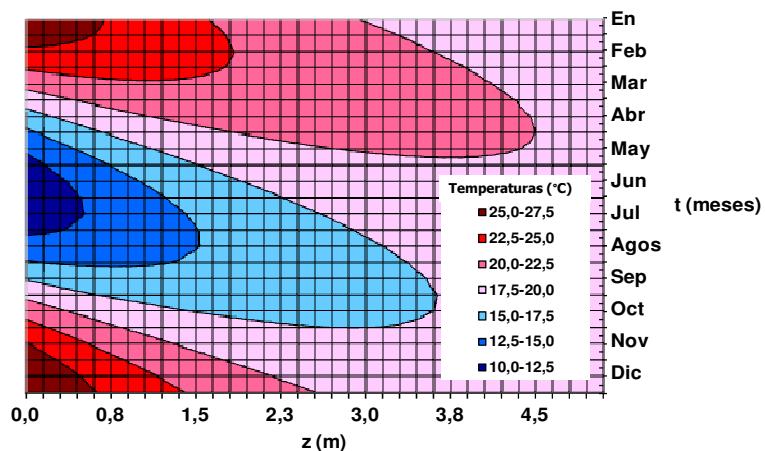
Información inferida a partir de los datos medidos



A una profundidad  $\approx 1 - 5$  m, la  $T$  del suelo es muy próxima a la  $T$  de confort todo el año.

37

## Temperaturas Tierra - Buenos Aires



38

## Conclusiones Parciales

- A una profundidad del orden de 4 m se produce una inversión de la temperatura (profundidad ideal para tubos enterrados).
- A partir de los 2 m la temperatura es aceptablemente estable y más accesible.

39

## Modelo 1 - Temperatura diarias del suelo usando Diferencias Finitas $T(z,t)$

Ecuación de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

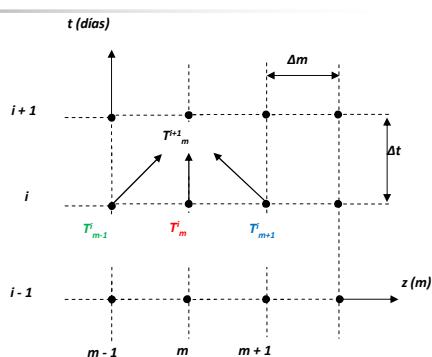
$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T(z,t+1) - T(z,t)}{\Delta t}$$

$$\approx \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t}$$

$$T_m^{i+1} = T_m^i + \tau (T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i)$$

Nº de Fourier

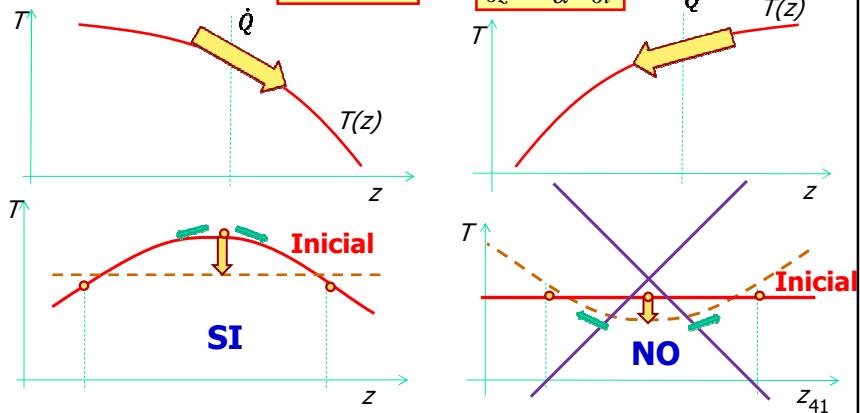
$$\tau = \alpha \Delta t / \Delta z^2 \leq 1/2$$



## Segunda Ley de la

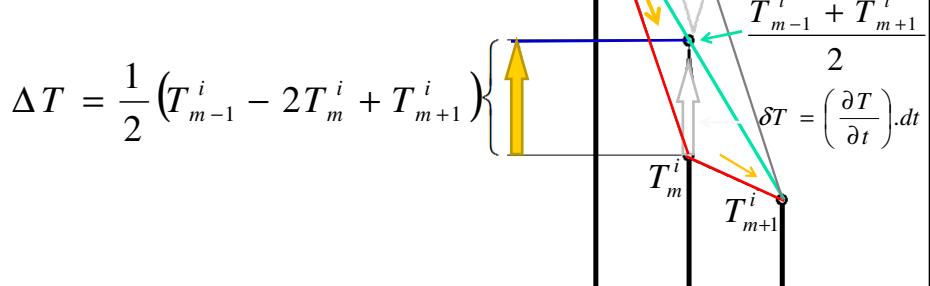
## Termodinámica

Uno de ellos: el calor siempre fluye de la fuente caliente a la fría  $\dot{Q} = \kappa \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$   $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$



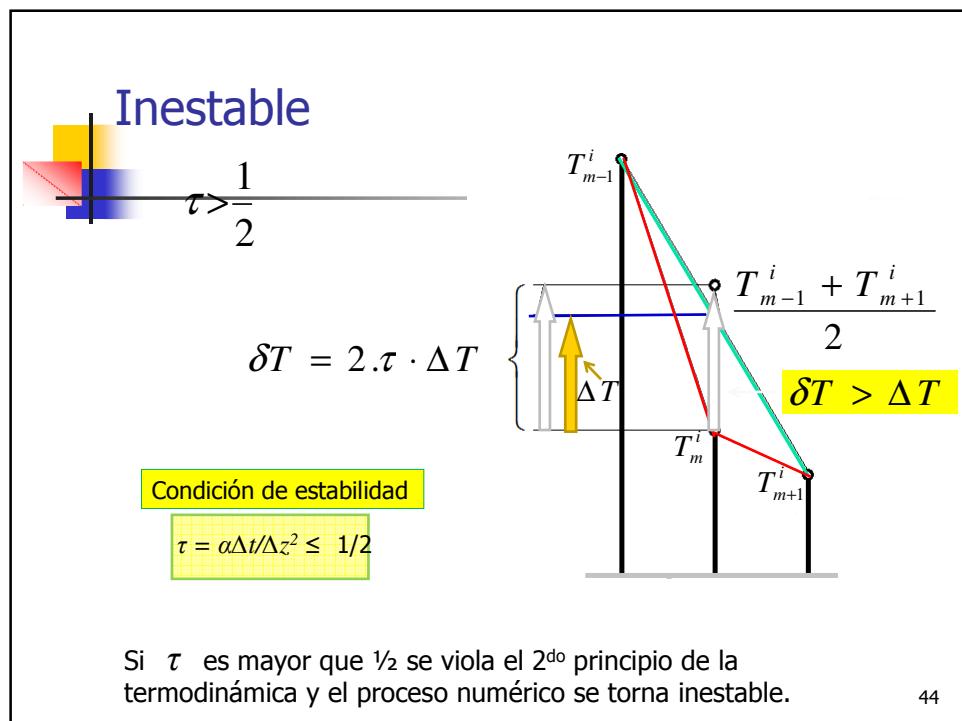
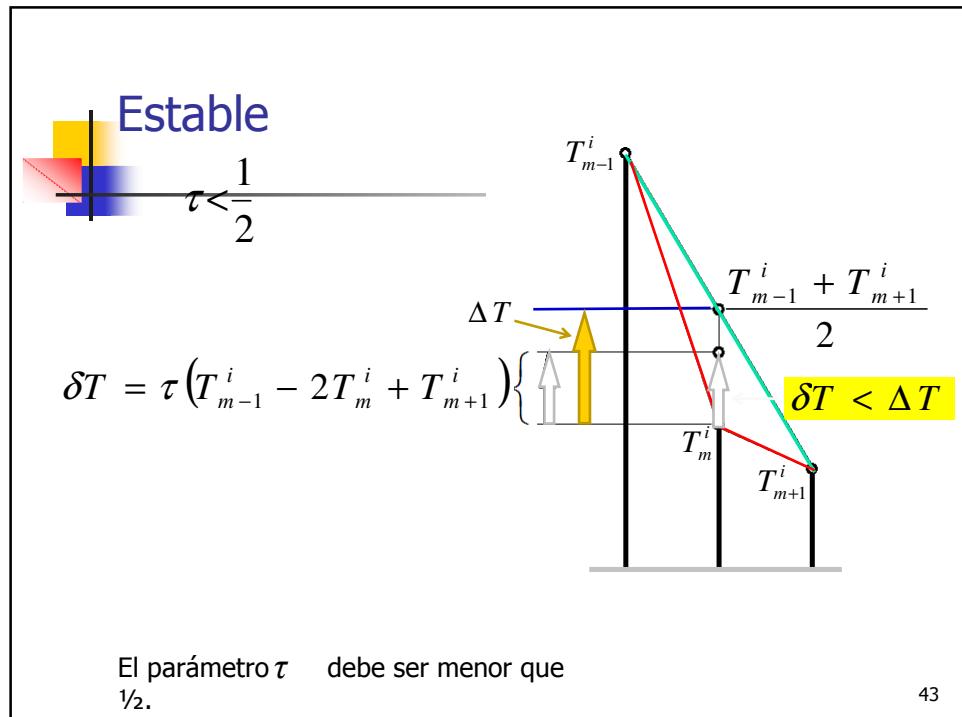
## Estabilidad

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \iff \delta T \approx 2 \cdot \tau \cdot \Delta T$$

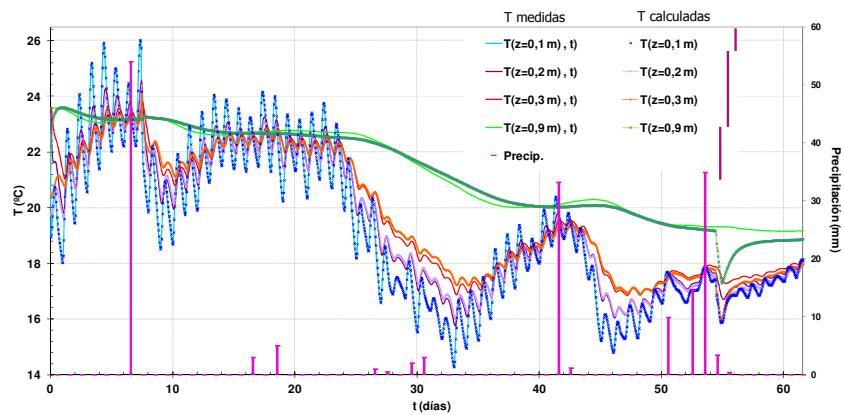


## Avance de T en el tiempo

$$\delta T = \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) dt \approx \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta z^2} \cdot \left[ T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i \right] = 2 \cdot \tau \cdot \Delta T$$



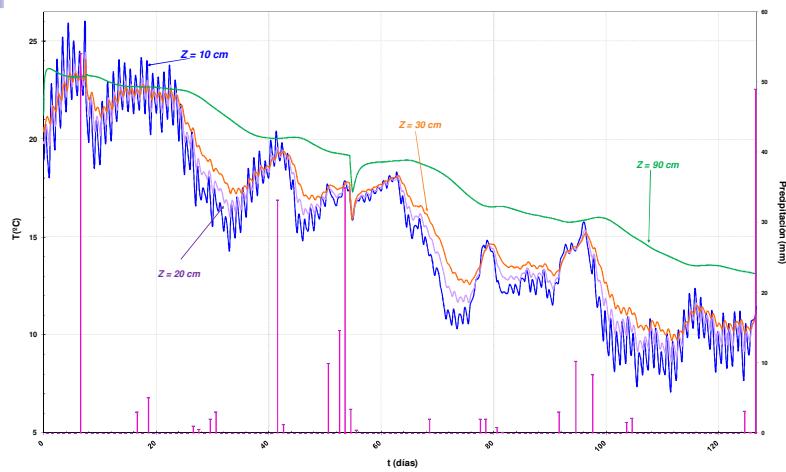
## Temperaturas medidas y calculadas con diferencias finitas



El modelo ajusta adecuadamente los datos medidos !

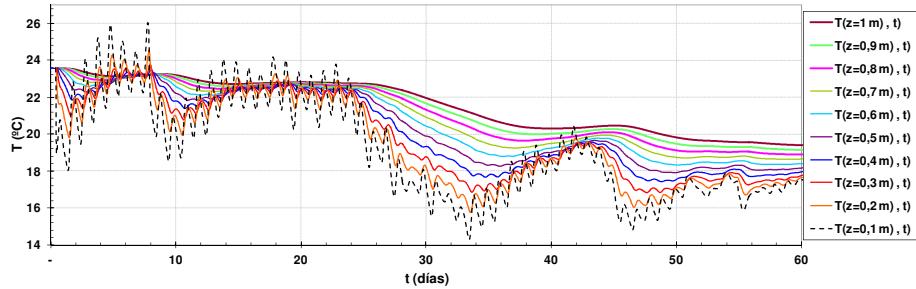
45

## Ondas de Calor del Suelo



46

## Predicción teórica de temperaturas



47

## Conclusiones Parciales

- El modelo se ajusta a los valores medidos de las  $T$  en función del  $t$  a diferentes profundidades.
- El modelo es adecuado para predecir las  $T$  a diferentes profundidades del suelo, época del año y  $t$ .

48

## La Tierra como Acondicionador de Aire Natural

49

Efecto conocido y usado desde la  
antigüedad



Ruinas de Quilmes - siglo XV.  
Valle Calchaquí, Tucumán, Argentina

50

## Efecto conocido y usado desde la antigüedad



Ciudad de Gharyan, 60 km al sur de Trípoli, Libia

- Pozo 10 x 10 m
- 8 m profundidad
- $T_{interior} \approx 20 - 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$  todo el año.
- $T_{exterior} \approx 30 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fuente: <http://www.clarin.com/suplementos/viajes/2008/03/16/v-01629375.htm>

51

## Casas subterráneas - Cuevas



Gharyan, Libia



Coober Pedy, Australia Meridional

52

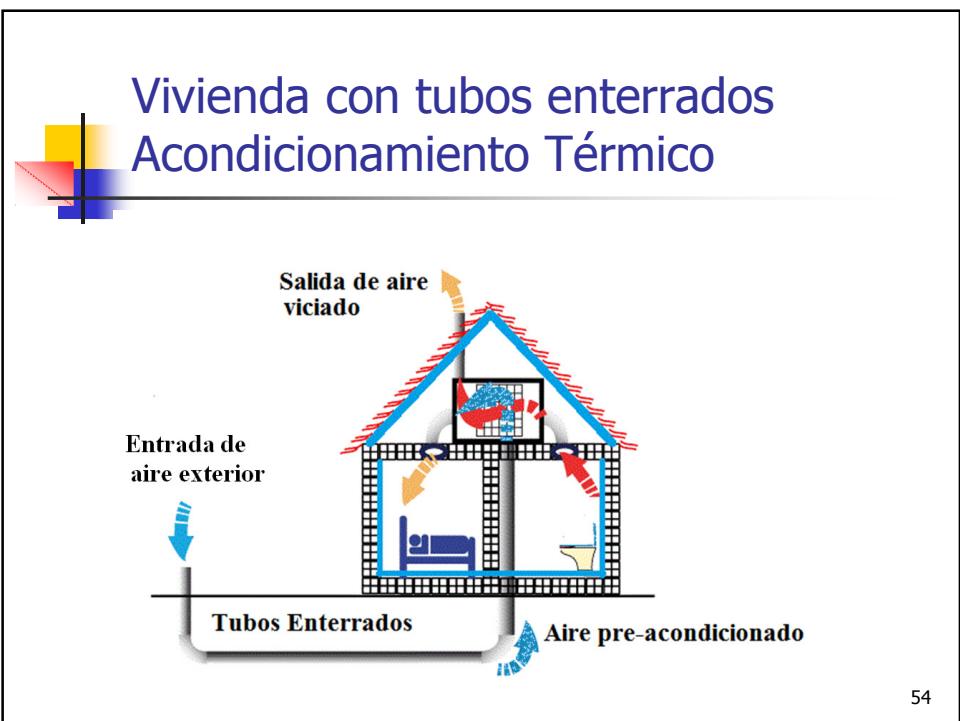
## Casas bajo tierra modernas



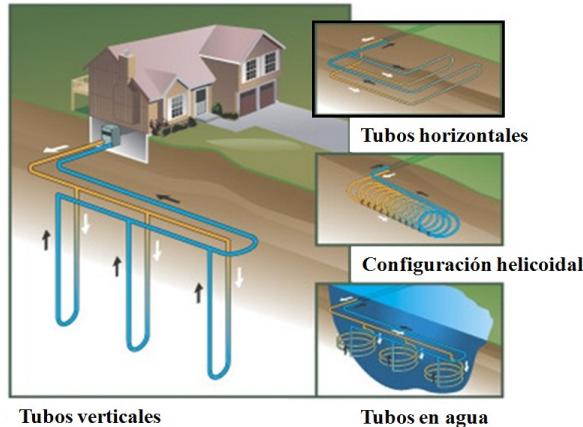
The Hills golf course  
near Arrowtown New  
Zealand (2009)



Earth-Sheltered  
Houses by Rob  
Roy EE.UU (2007)



## Acondicionamiento térmico de interiores



55

## CasaE de Basf – Tortuguitas, Buenos Aires, Argentina



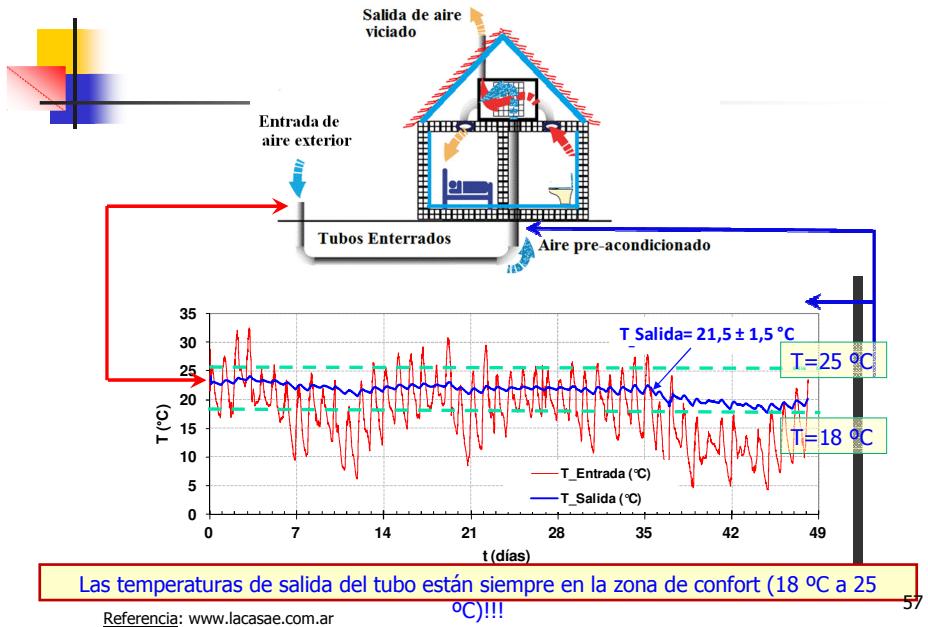
COLABORACIÓN

UNSAM- INTI –  
ENARGAS – BASF

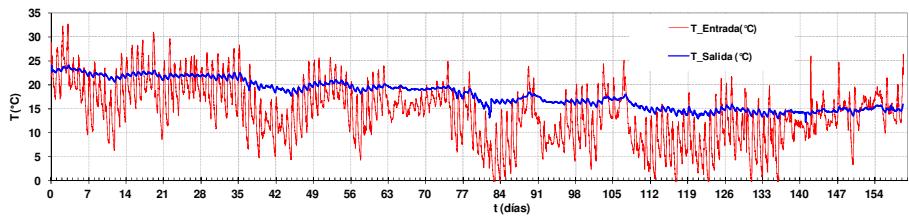
Fuente: [www.lacasaе.com.ar](http://www.lacasaе.com.ar)

56

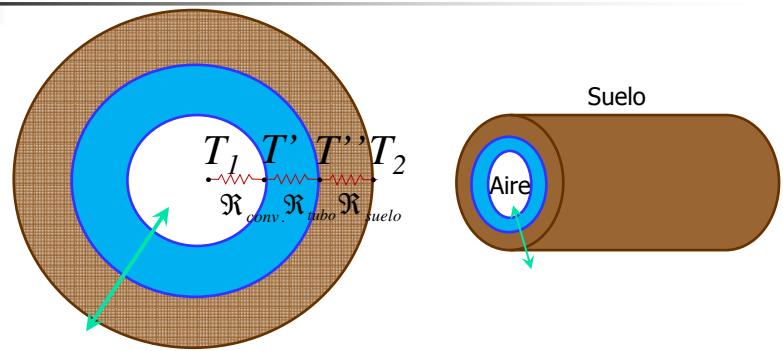
## Experimento CasaE de BASF



## Temperatura Entrada/Salida CasaE



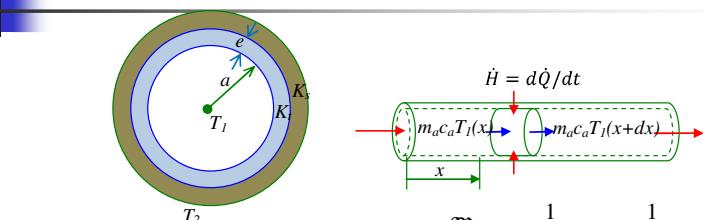
## Modelo 2- Sistema Intercambio de Calor Suelo – Aire



$$\delta R_{total} = \delta R_{conv.} + \delta R_{tubo} + \delta R_{suelo}$$

59

## Modelo del Sistema Intercambio de Calor Suelo – Aire



$$\delta R_{total} = \delta R_{conv.} + \delta R_{tubo} + \delta R_{suelo}$$

$$\delta R_{conv.} = \frac{1}{dA \cdot h} = \frac{1}{(2\pi \cdot a \cdot dx) \cdot h_a}$$

$$\delta R_{tubo} = \frac{\ln\left(1 + \frac{e}{a}\right)}{2\pi \cdot K_t \cdot dx}$$

$$\delta R_{suelo}^{(1)} = \frac{\ln[2z/(a+e)]}{2\pi \cdot K_s \cdot dx}$$

$$\delta R_{suelo}^{(2)} = \frac{\ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi \cdot K_s \cdot dx} = \frac{\ln[z/(a+e)]}{2\pi \cdot K_s \cdot dx}$$

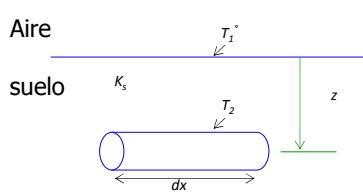
60

$$\lambda_{(1)} = \frac{c_a \rho_a \cdot Q_a}{2\pi \cdot K_t} \cdot \left[ \frac{K_t}{h_a \cdot a} + \ln(1 + e/a) + K_t \frac{\ln[2z/(a+e)]}{K_s} \right]$$

$$\lambda_{(2)} = \frac{c_a \rho_a \cdot Q_a}{2\pi \cdot K_t} \cdot \left[ \frac{K_t}{h_a \cdot a} + \ln(1 + e/a) + K_t \frac{\ln[z/(a+e)]}{K_s} \right]$$

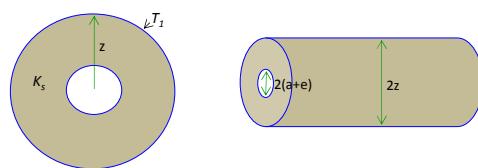
## Modelo del Sistema Intercambio de Calor Suelo – Aire (cont.)

Tubo en un medio finito (1)



Tubo en un medio cilíndrico (2)

*z* = profundidad



$$\delta\mathfrak{R}_{suelo}^{(1)} = \frac{\ln[2z/(a+e)]}{2\pi \cdot K_s \cdot dx}$$

$$\delta\mathfrak{R}_{suelo}^{(2)} = \frac{\ln[z/(a+e)]}{2\pi \cdot K_s \cdot dx}$$

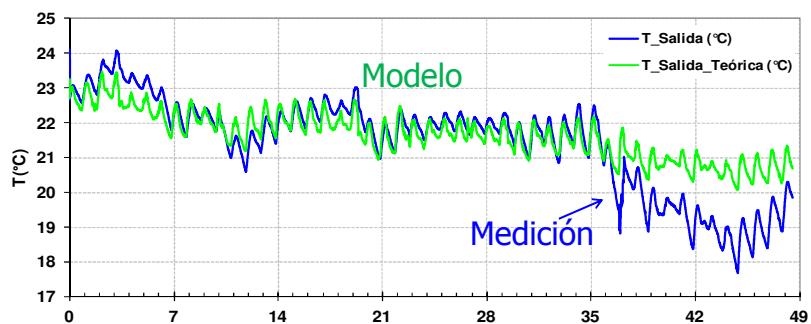
## Modelo del Sistema Intercambio de Calor Suelo – Aire (cont.)

Temperatura del aire, después de viajar un longitud  $x$  de tubo

$$T(x) = T_{suelo} + (T_{amb} - T_{suelo}) \cdot e^{-x/\lambda}$$

63

## Modelo T salida del tubo



64

## Material del tubo

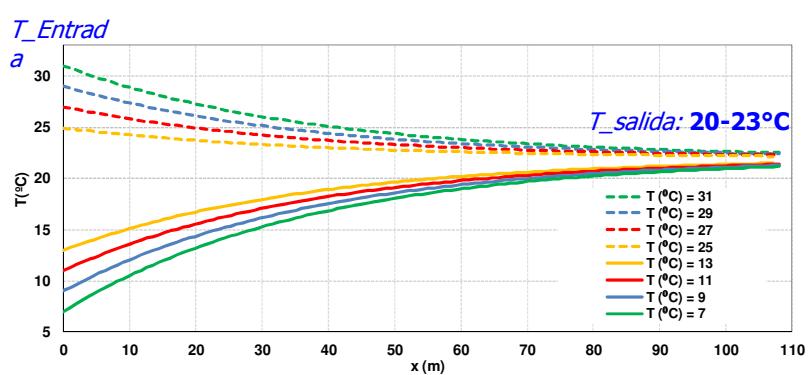
Modelo	$\lambda_{\text{conv}}$ (m)	$\lambda_{\text{tubo}}$ (m)	$\lambda_{\text{suelo}}$ (m)	$\lambda_{\text{total}}$ (m)
$\lambda_{(1)}$	0,7	4,88	31,85	37,43
$\lambda_{(2)}$			25,87	31,45

Material_tubo	$\lambda_{\text{tubo}}$ (m)	$\lambda_{\text{total}}$ (m)
Aluminio	0,00643	32,5
Bronce	0,00892	32,5
Cobre	0,00356	32,5
Plomo	0,03847	32,6

Material tubo usado: Policloruro de Vinilo (PVC)  
Partículas de plata

65

## Modelo Largo del tubo



66

## Conclusiones Parciales

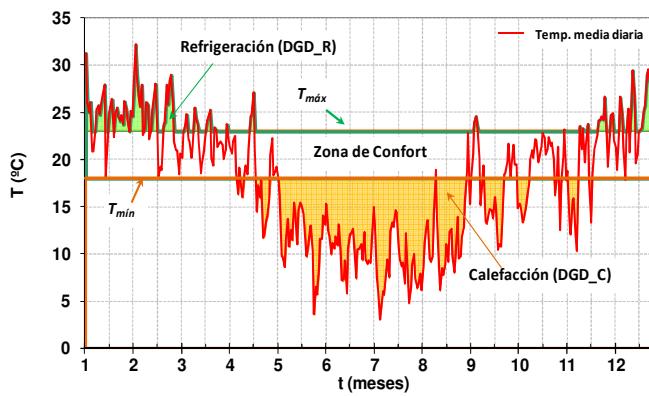
- Flujo de aire a la salida con  $T$  prácticamente constante y muy próxima a la de "confort"
- Se obtuvo un buen ajuste entre las mediciones de  $T$  del aire a la salida del tubo y las calculadas teóricamente.
- Este método permite calcular la longitud optima del tubo
- Ejemplo de sistema Eficiente del uso de la energía
- Uso de la energía  $\downarrow$  GEI

67

## Factor de ahorro de energía en el acondicionamiento térmico

### Conceptos:

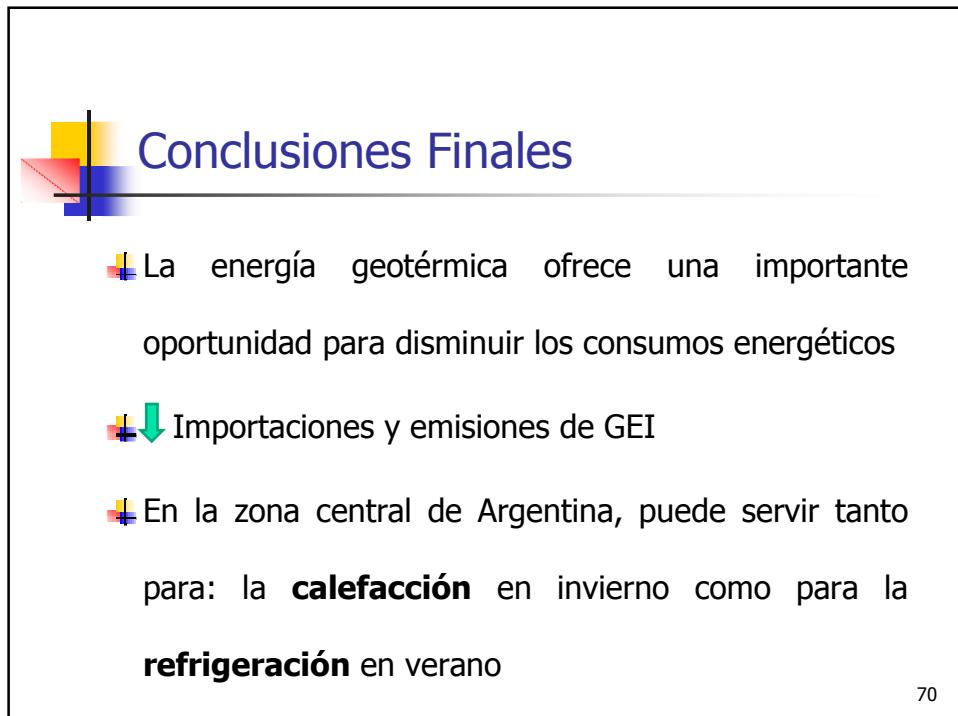
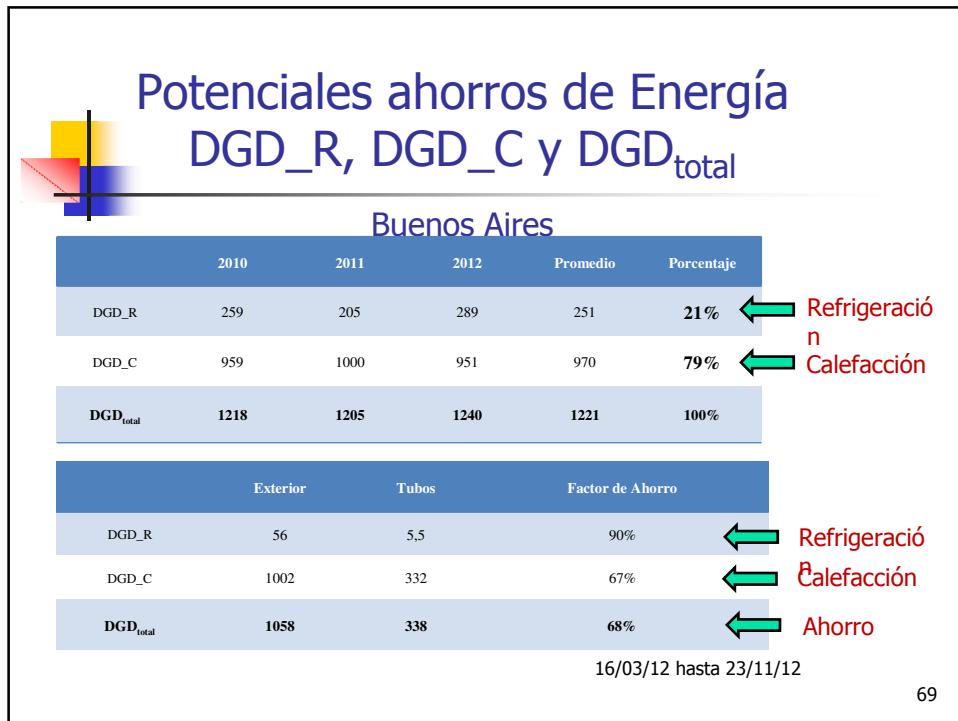
- ✓ DGD\_R
- ✓ DGD\_C

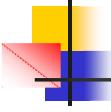


$$DGD\_R = \sum_{Año} (T_m(t) - T_{máx}) \Big|_{T(t) > T_{máx}}$$

$$DGD\_C = \sum_{Año} (T_{mín} - T_m(t)) \Big|_{T(t) < T_{mín}}$$

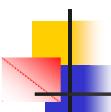
68





**“La energía más limpia y  
barata, es la que nunca  
se usa”**

71



**Muchas Gracias!**

**Agradecimientos:**

**Jorge Fiora (INTI)**  
**Pablo Romero (INTI)**  
**Pedro Cozza (INTI)**  
**Ángel Bermejo (INTI)**  
**Roberto Prieto (ENARGAS)**  
**Enrique Bezzo (ENARGAS)**  
**Horacio Raiano (BASF)**  
**Pablo Azqueta (Arquitecto- CasaE)**  
**Oscar Romanelli (UNSAM)**  
**Javier Fernández Vázquez (UNSAM)**

72