

Madrid, 1 de febrero de 2017

# CAPACIDAD DE AMORTIGUACIÓN DE LA HUMEDAD INTERIOR EN EDIFICIOS

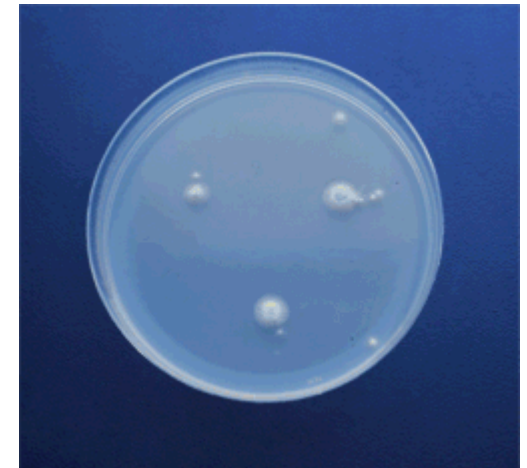


[gomez.arriaran@ehu.eus](mailto:gomez.arriaran@ehu.eus)

943 01 7196

Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa – Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea

- EL PROBLEMA
  - Germinación/crecimiento hongos
  - Durabilidad cerramientos
  - Consumo energético
  - Confort térmico
- LAS ISOPLETAS
- LOS FACTORES
- LA SOLUCION PASIVA
- LA PREDICCIÓN



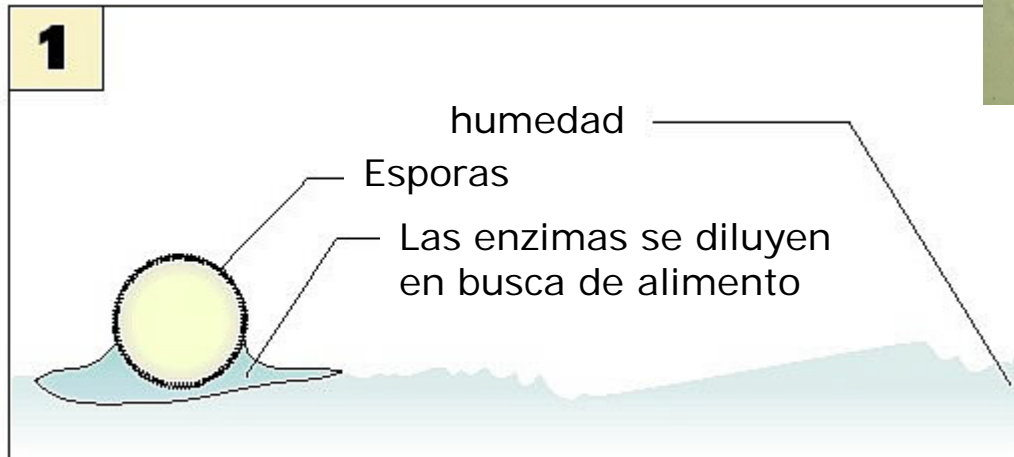
# Humedad en los edificios: Impacto salubridad

## germinación y crecimiento de mohos

- Esporas de hongos,
- Oxígeno
- Temperatura propicia (10-30 ° C)
- Sustrato nutriente (aire interior)
- **AGUA**

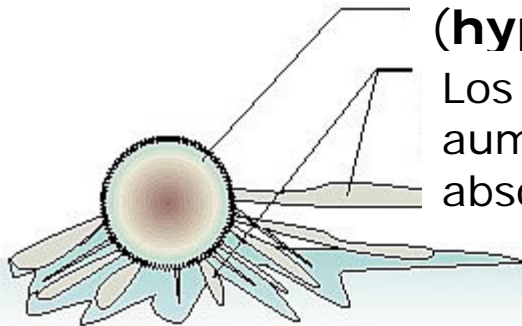


conidia



## germinación y crecimiento de mohos

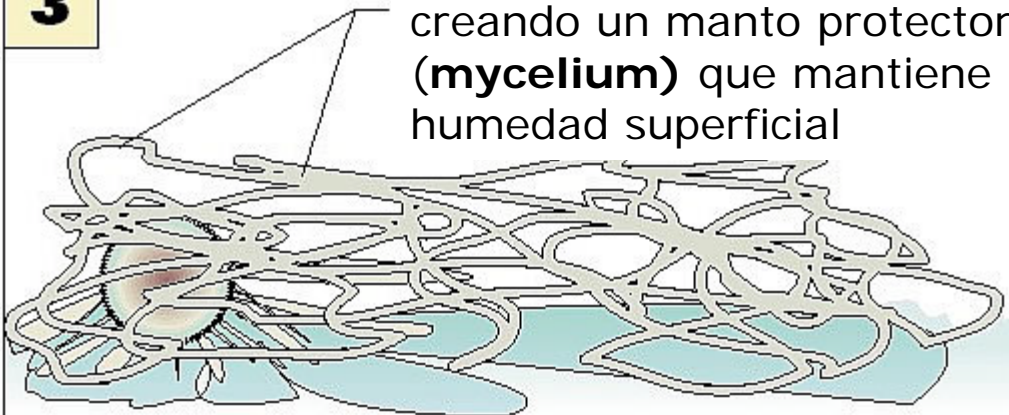
2



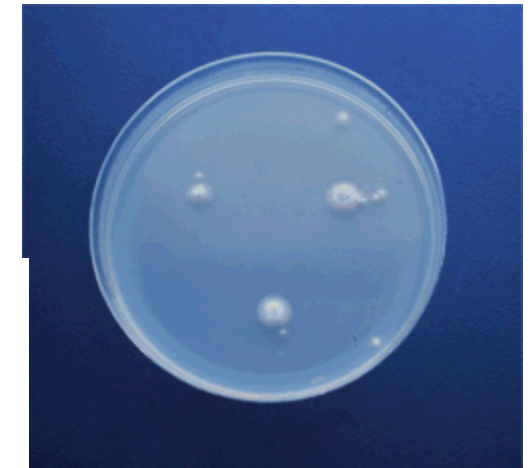
Esporas germinan produciendo filamentos (**hyphae**)

Los hyphae se extienden aumentando área absorptiva

3

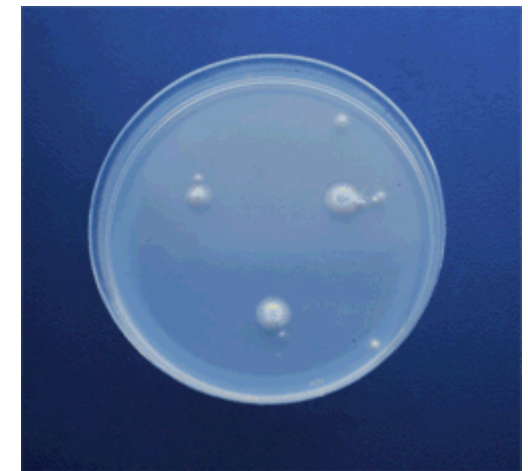


Los hyphae crecen rápidamente creando un manto protector (**mycelium**) que mantiene la humedad superficial



Germinación esporas

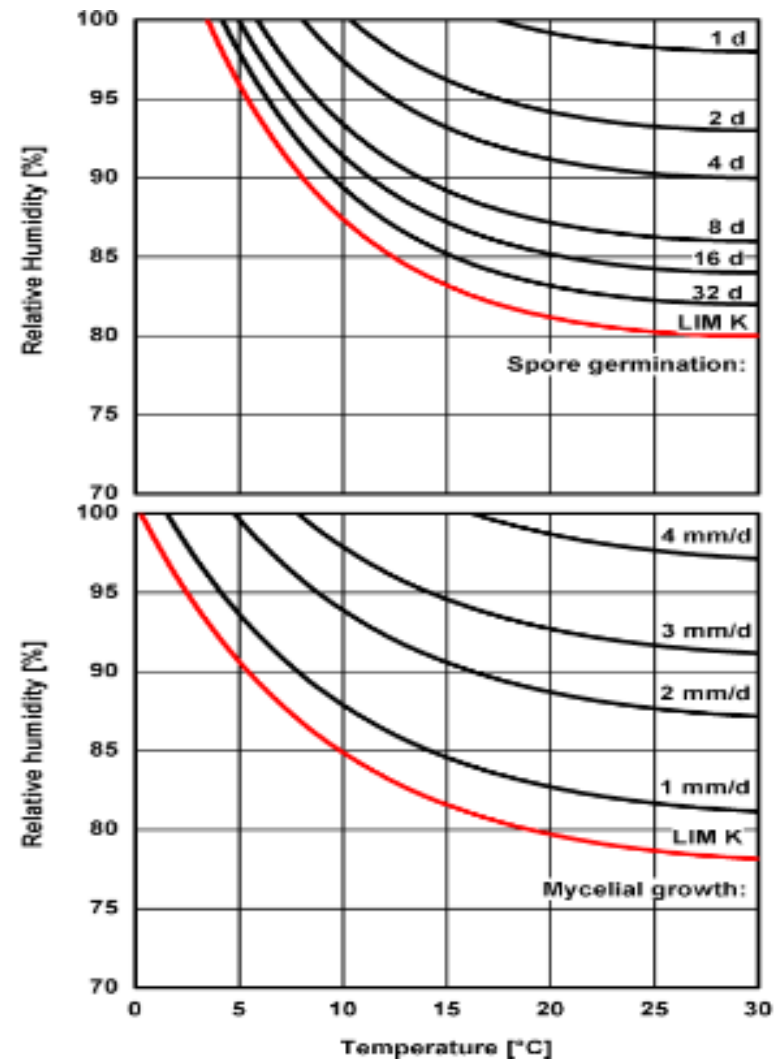
## germinación y crecimiento de mohos



Germinación esporas

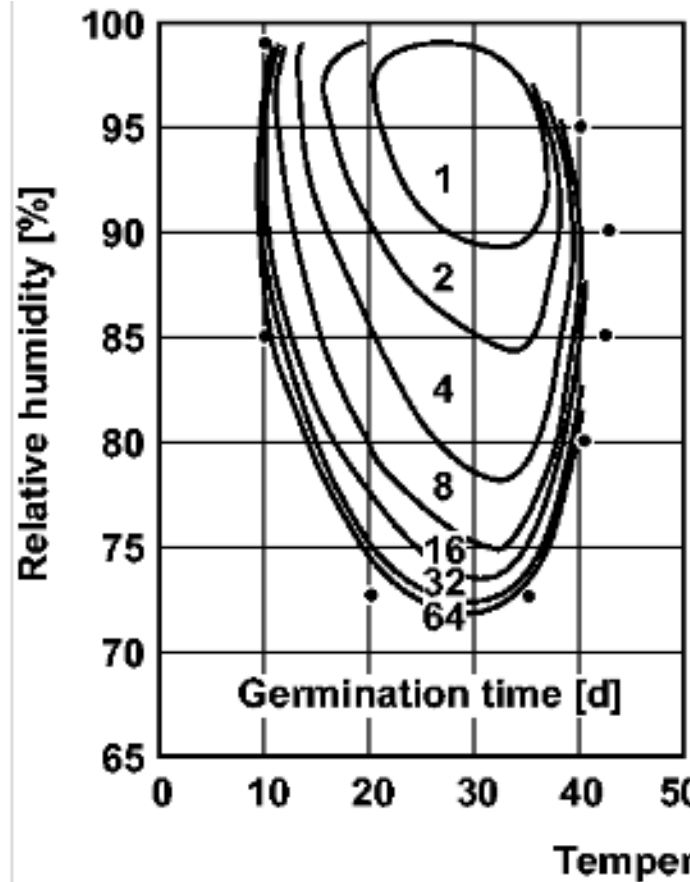


- EL PROBLEMA
- LAS ISOPLETAS
  - Caracterización del riesgo

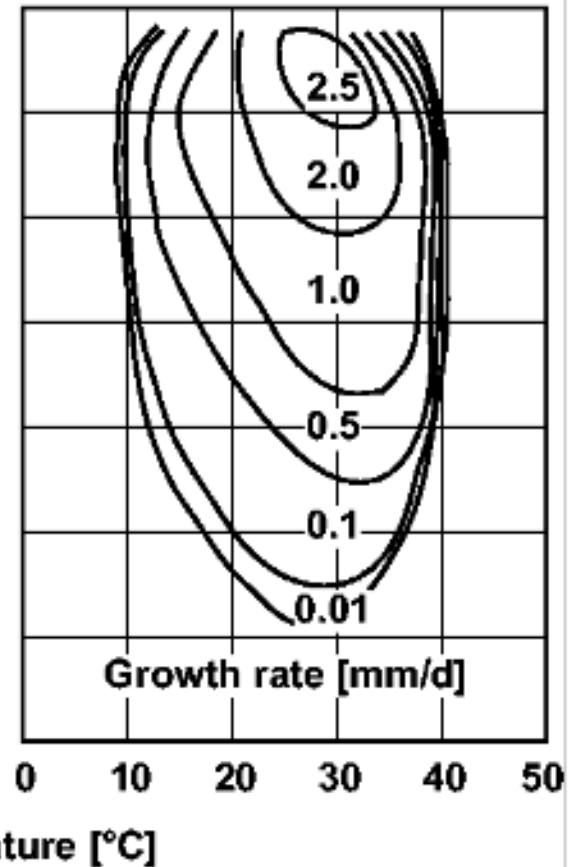


**ISOPLETAS:** representación de las condiciones de humedad y temperatura para la germinación de esporas y el crecimiento del micelio

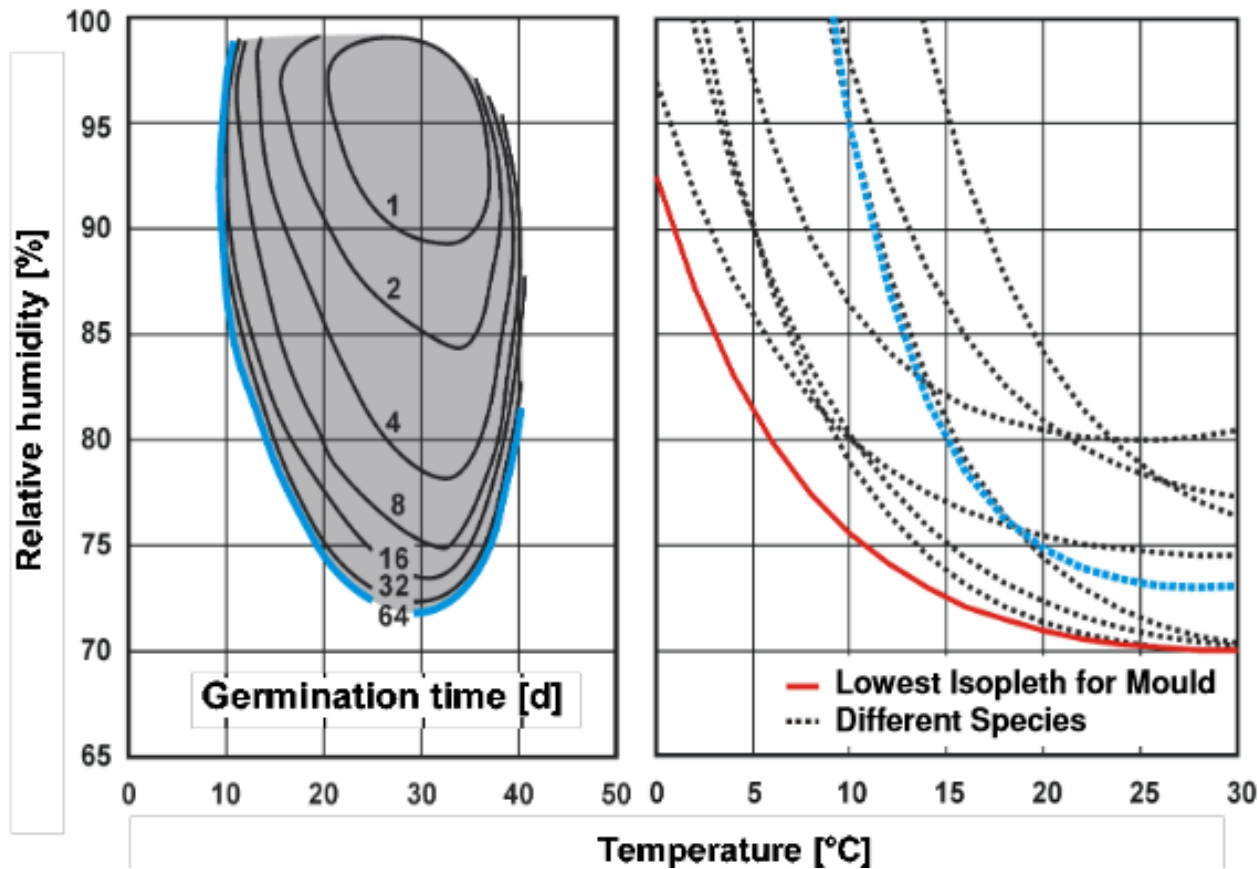
### Germinación esporas



### Crecimiento micelio



**LIM:** representa el límite más bajo de la combinación de todas las isopletas de todas las especies de hongos. Por debajo de estas condiciones no germina/florece ninguna especie de hongo



*Aspergillus fumigatus*

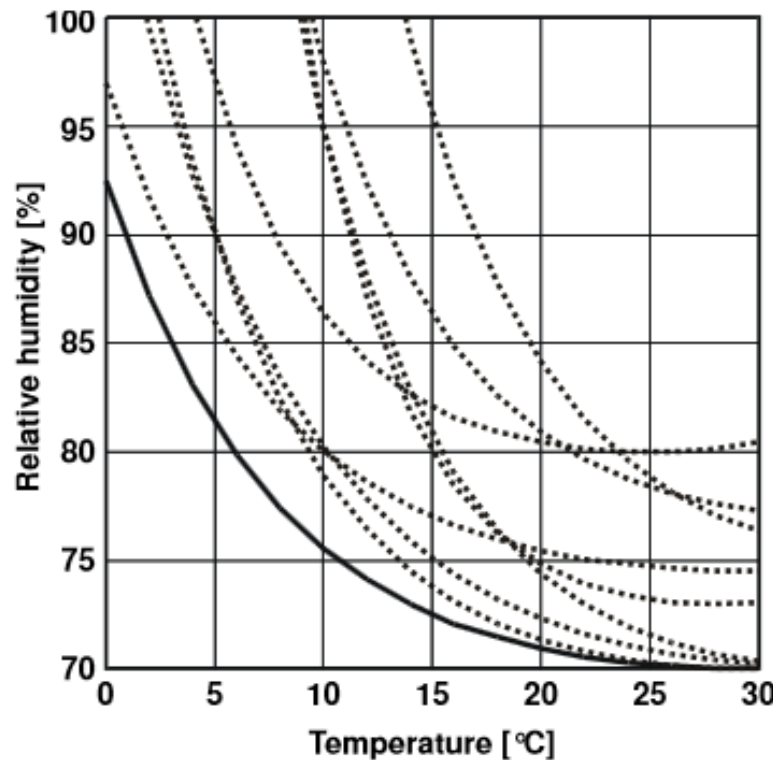
*Aspergillus flavus*

*Stachybotrys chartarum*

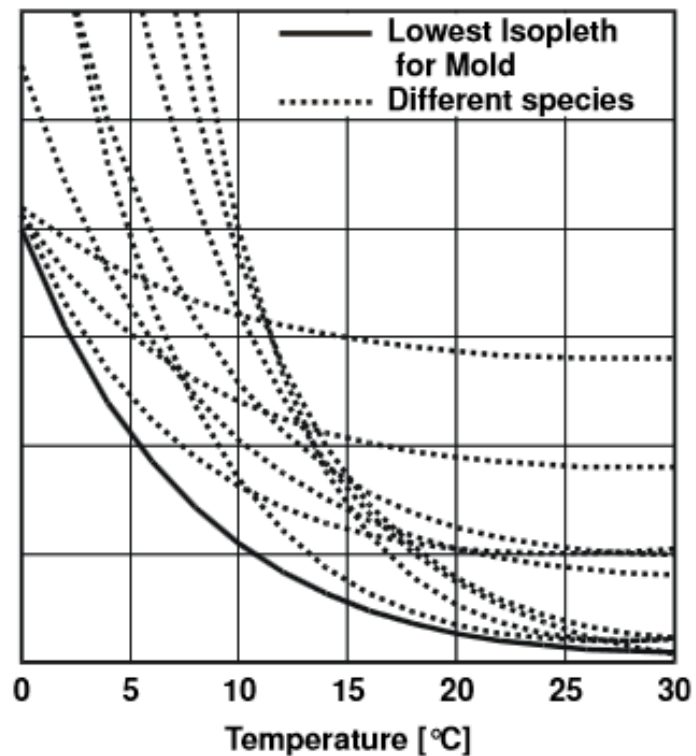


- LIM germinación de esporas > LIM crecimiento del micelio.
- Esto significa que si se produce la germinación de esporas también se producirá el crecimiento del micelio subsiguiente.

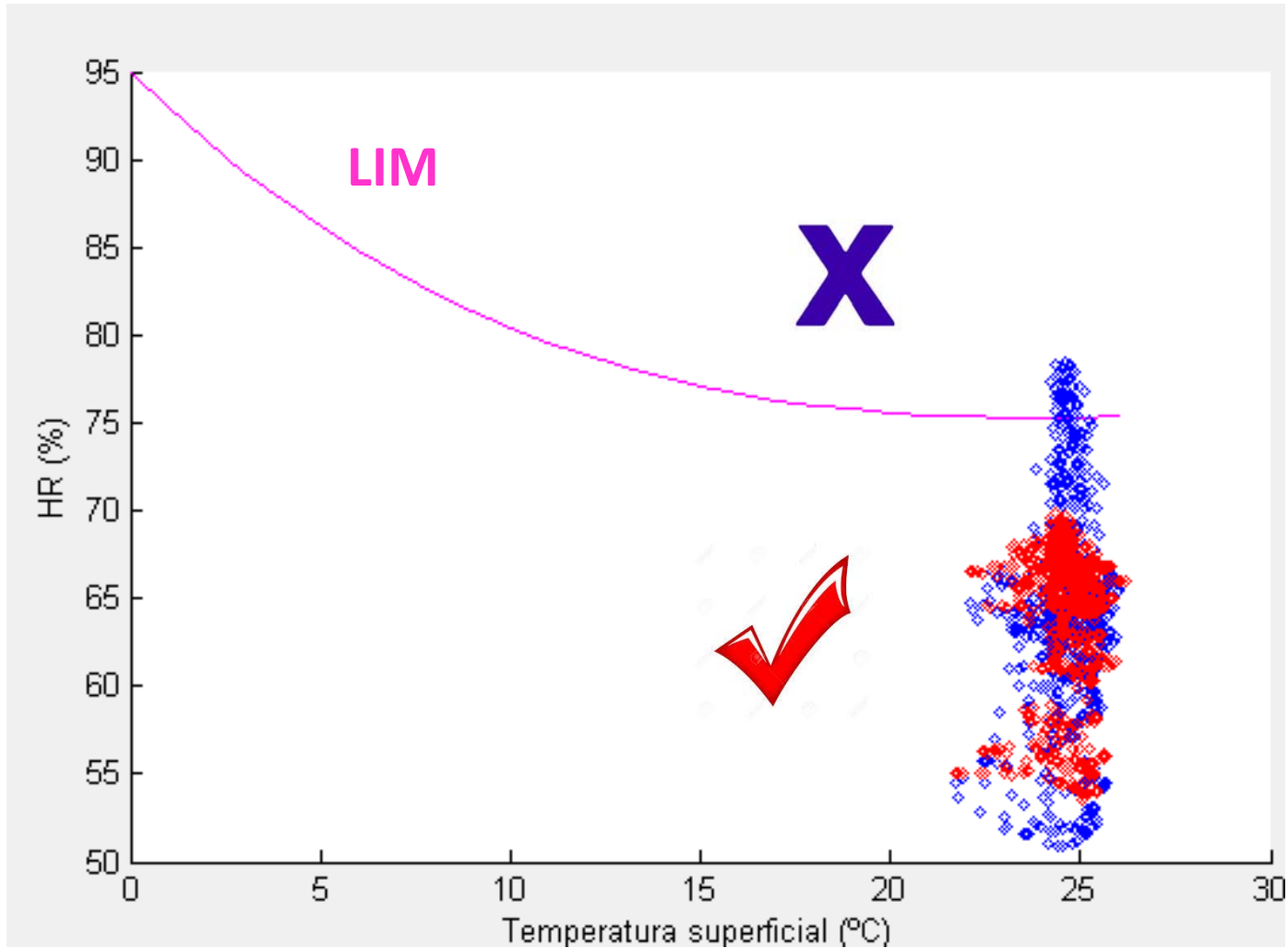
### Germinación esporas



### Crecimiento mycelium



Barcelona, Julio,  $0.6 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



- EL PROBLEMA
- LAS ISOPLETAS
- LOS FACTORES
  - El balance higroscópico



## FACTORES QUE DETERMINAN LA HR interior

- El nivel de humedad interior depende de :

1. el clima exterior
2. la tasa de ventilación
3. la producción de humedad de los ocupantes
4. la **inercia higroscópica de los materiales** que conforman **la envolvente y el mobiliario.**

→ Balance higroscópico del recinto

# Inercia higrotérmica

- **Inercia térmica:** efecto combinado de absorber, almacenar y emitir energía térmica desde/hacia los alrededores en respuesta a los cambios en las condiciones térmicas ambientales
- **Inercia higroscópica:** efecto combinado de absorber, almacenar y emitir humedad desde/hacia los alrededores en respuesta a los cambios en las condiciones higrotérmicas ambientales

# Balance higroscópico de los recintos

## FUENTES DE HUMEDAD

2-Tasa de ventilación



3- Producción de vapor interior

4-INERCIA  
HIGROSCÓPICA

HR interior

## SUMIDEROS DE HUMEDAD

2- Tasa de ventilación

Amortiguación de las  
variaciones de HR

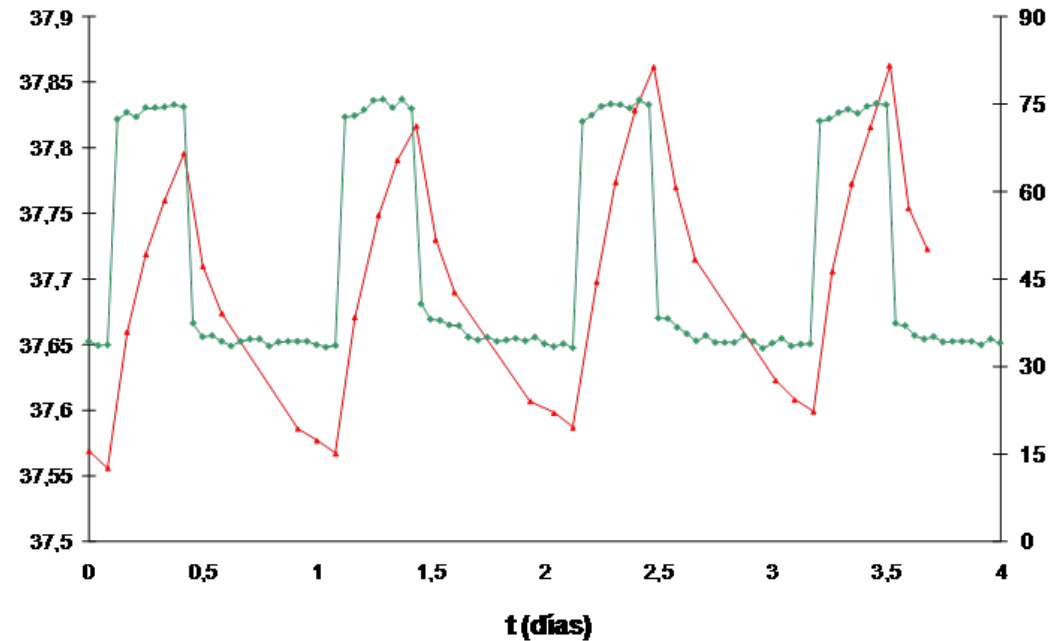
## Balance higroscópico de los recintos

$$\frac{V}{R_v T_i} \cdot \frac{\partial P_{vi}}{\partial t} = \frac{nV}{3600 R_v T_i} \cdot (P_{ve} - P_{vi}) - \dot{G}_v - \sum_{j=1}^k A_{sj} \cdot g_{mbj}$$

Diagram illustrating the components of the hygroscopic balance equation:

- $\frac{V}{R_v T_i} \cdot \frac{\partial P_{vi}}{\partial t}$ : Termino transitorio (régimen dinámico)
- $\frac{nV}{3600 R_v T_i} \cdot (P_{ve} - P_{vi})$ : Renovaciones de aire
- $\dot{G}_v$ : Producción de vapor
- $\sum_{j=1}^k A_{sj} \cdot g_{mbj}$ : Capacidad de amortiguamiento de humedad

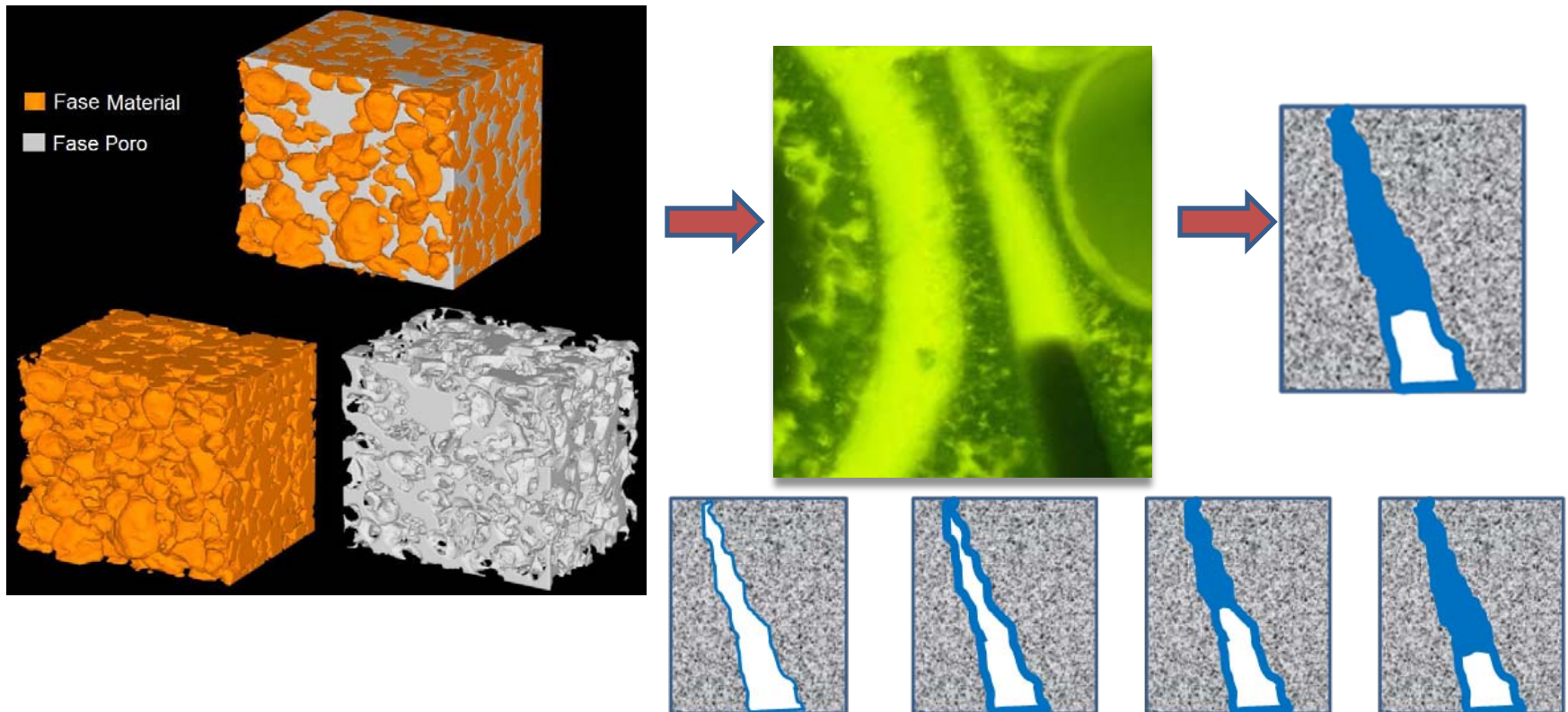
- EL PROBLEMA
- LAS ISOPLETAS
- LOS FACTORES
- LA SOLUCION PASIVA
  - El Moisture Buffering





## Capacidad de amortiguamiento de humedad (MBV)

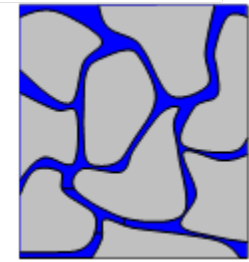
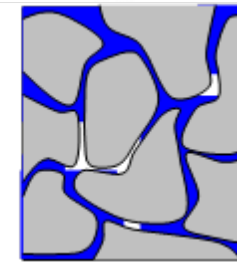
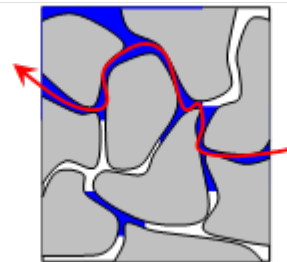
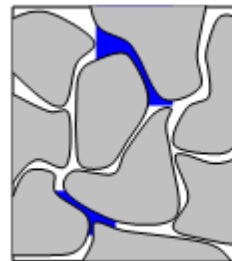
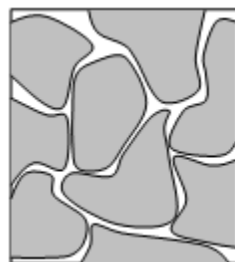
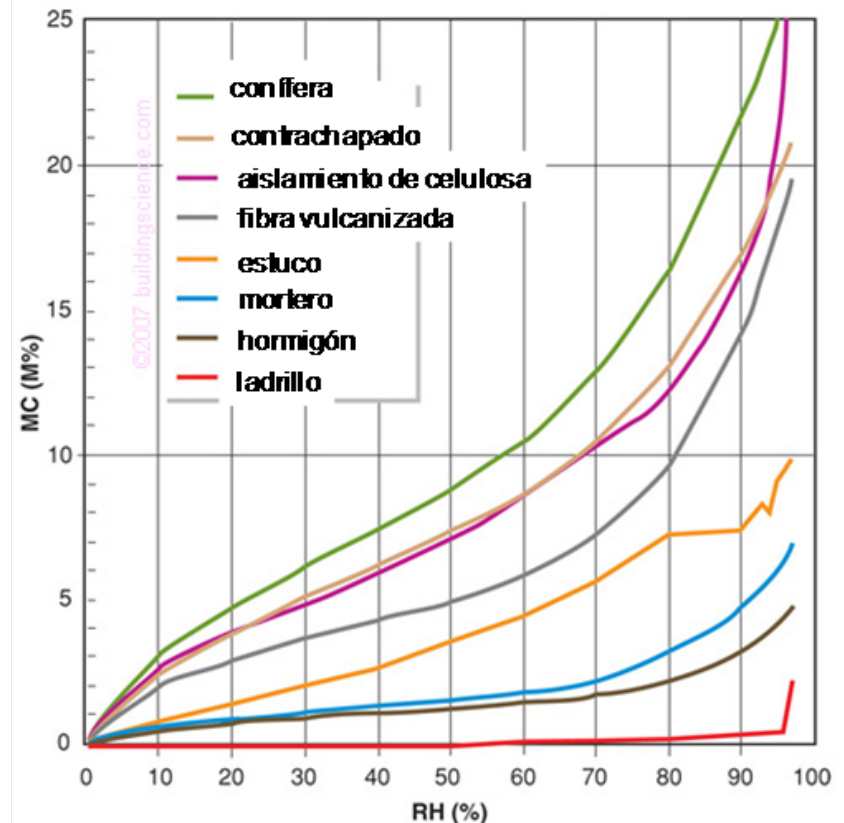
- Los materiales de construcción son porosos, y por lo tanto presentan capacidad de almacenar/transportar humedad



La capacidad de almacenamiento de humedad:

$$w(\phi)$$

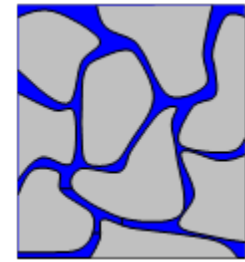
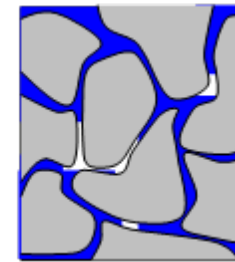
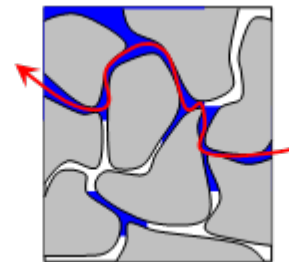
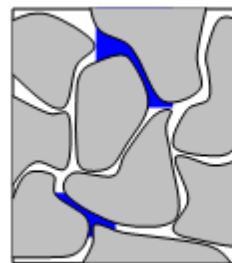
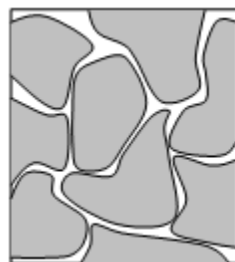
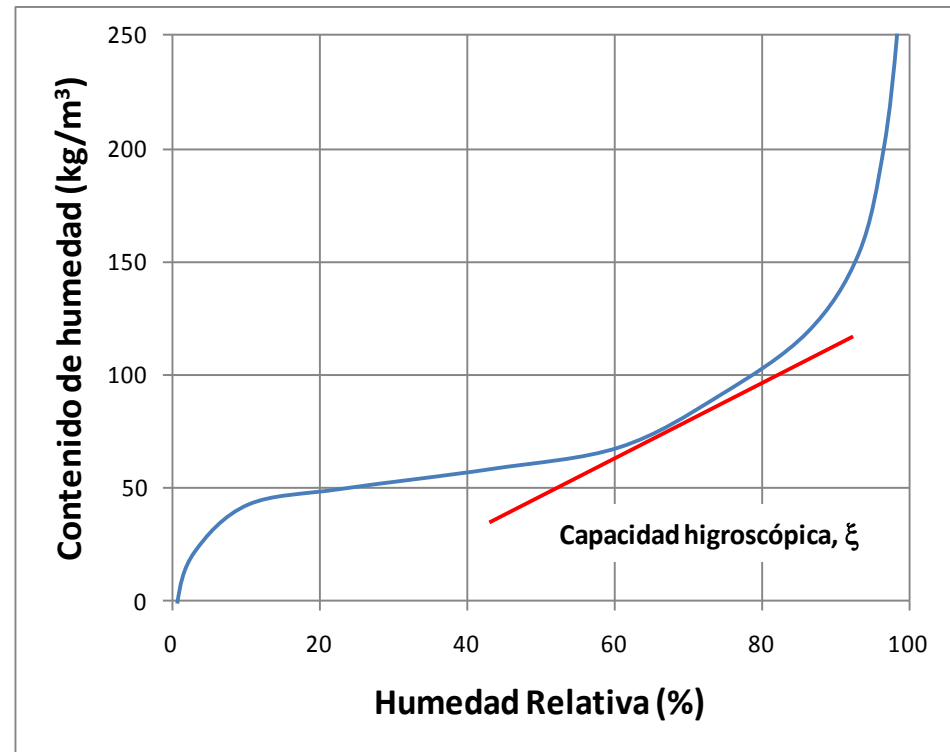
- se refleja mediante la **isoterma de sorción** y la curva de retención de agua
- depende de la **estructura porosa** (tamaño y distribución de poros).



- La capacidad de humedad:

$$\xi = \frac{\partial w(\phi)}{\partial \phi}$$

representa la cantidad de humedad que adsorbe/desorbe el material tras un cambio de humedad relativa del ambiente



## Mecanismos de transporte

Difusión de vapor

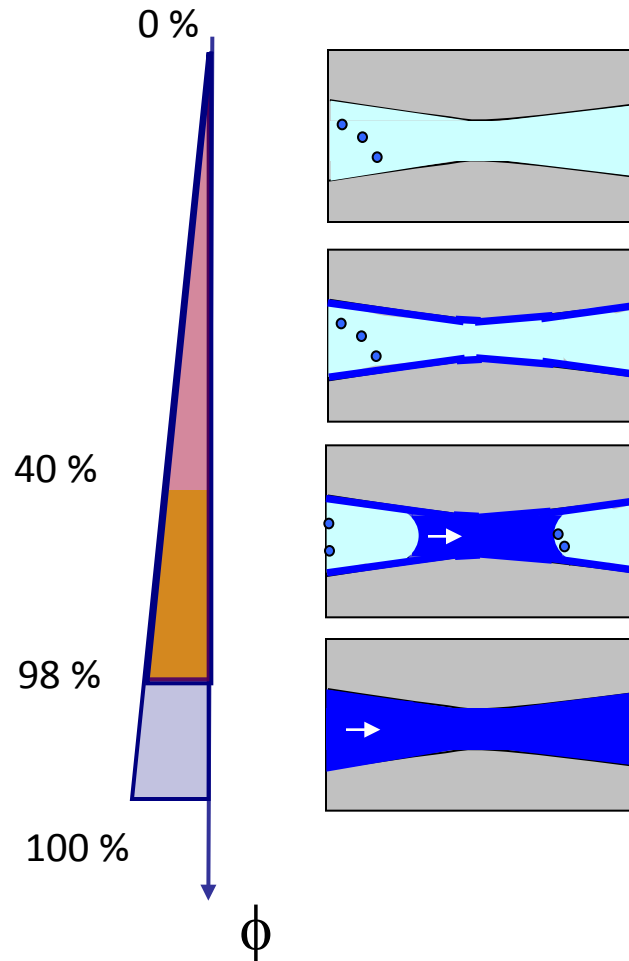
Capilaridad

~~Termodifusión~~  
(proceso isotérmico)

~~Convección~~  
(aire a P atmosférica)

~~Difusión superficial~~  
(F.adhesión > F. inercia)

~~Gravitacional~~  
(efectos gravitacionales despreciables)



Mecanismo  
microscópico

Transporte  
macroscópico

Difusión (efusión)

VAPOR

Difusión (efusión) +  
difusión superficial

VAPOR

Difusión +  
condensación capilar

VAPOR

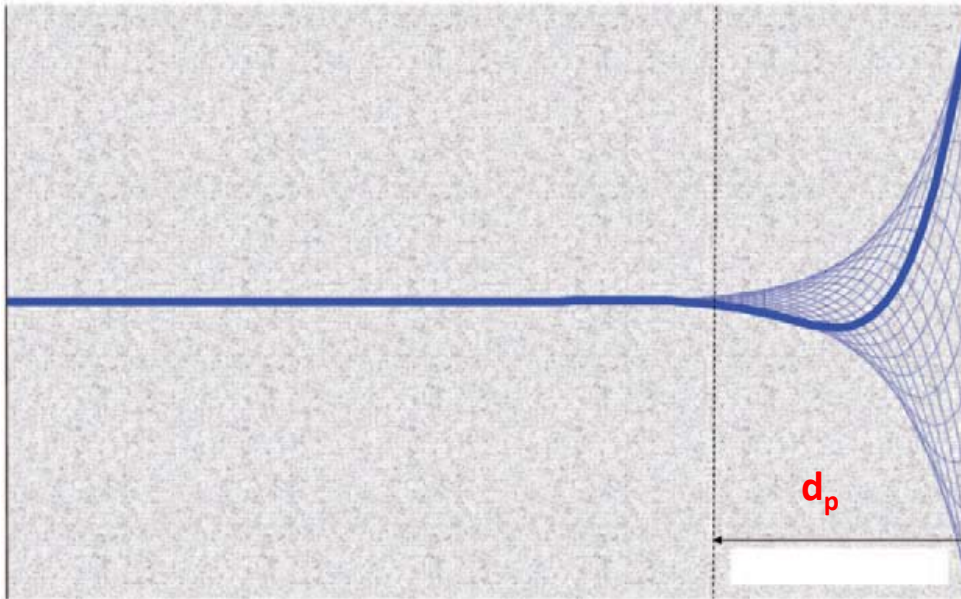
Capilaridad

LÍQUIDO

• Interacción Almacenamiento + Transporte en régimen dinámico

- Difusividad a la humedad,  $D_w \left[ \frac{m^2}{s} \right]$
- Efusividad a la humedad,  $b_m \left[ \frac{kg}{m^2 Pa \cdot s^{1/2}} \right]$

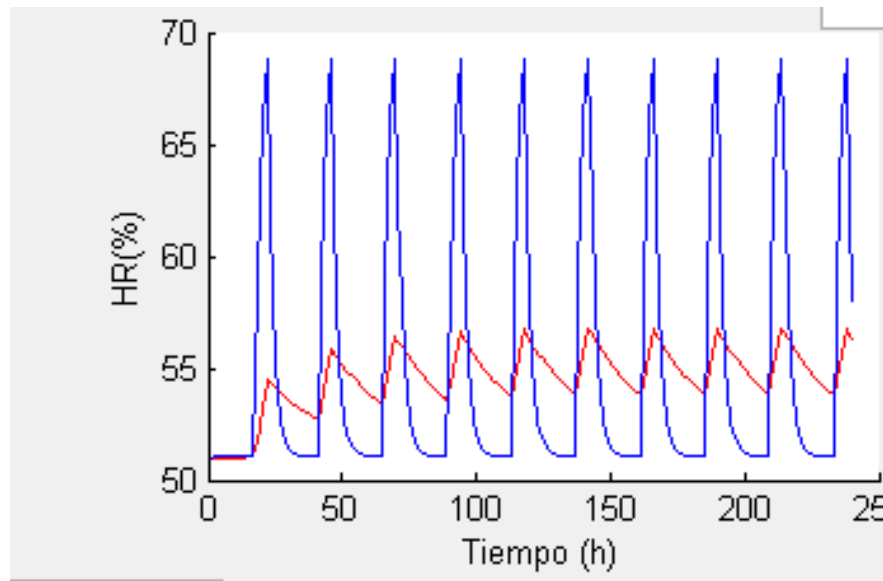
La profundidad de penetración de humedad,  $d_p \ [m]$



Representa el espesor de la **capa de material activa** que interactuará ante las variaciones del contenido de humedad del aire interior

Todas estas propiedades confieren una **inercia higroscópica** al material en contacto con el ambiente interior, que **permite amortiguar las oscilaciones** de HR.

El **MBV** es la propiedad que determina el potencial de un material para **amortiguar las variaciones bruscas de humedad relativa del ambiente** al que está expuesto.



- **Cálculo del MBV teórico:** a partir de propiedades higroscópicas

muestra

MATERIAL: Arcilla 04

**Basic properties**

**Sorption isotherm**

Adjustment model: Roels & Janssen

Fitting parameters:

wsat = 367 m = -54845 n = 1.53

$$W = W_{lim} \frac{(b-1) \cdot \varphi}{(b-\varphi)}$$

RH (%) =

Moisture content [kg/m3] =

**Water vapour permeability - μ factor**

Fitting parameters:

a = 4.88E-03 b = 2.94E-04 c = 5.08

$$\mu = \frac{1}{a + b \cdot e^{c \cdot \varphi}}$$

RH (%) =

Water vapour permeability [kg/(s·m·Pa)] =

μ (-) =

**Sorption isotherm**

**Water vapor diffusion resistance factor**

**Moisture Buffer Value**

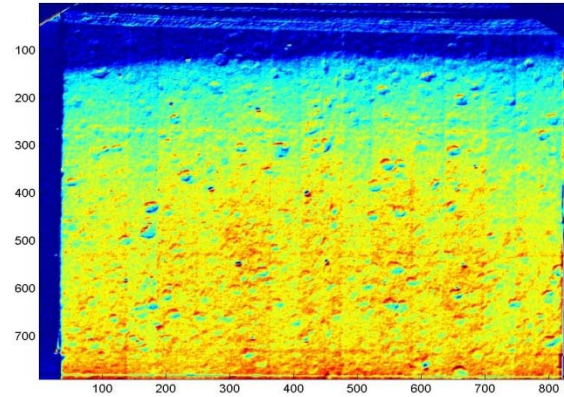
**Theoretical**

**Ideal MBV (8/16h)**

Ideal MBV = 0.107 [g/(m2·RH%)]

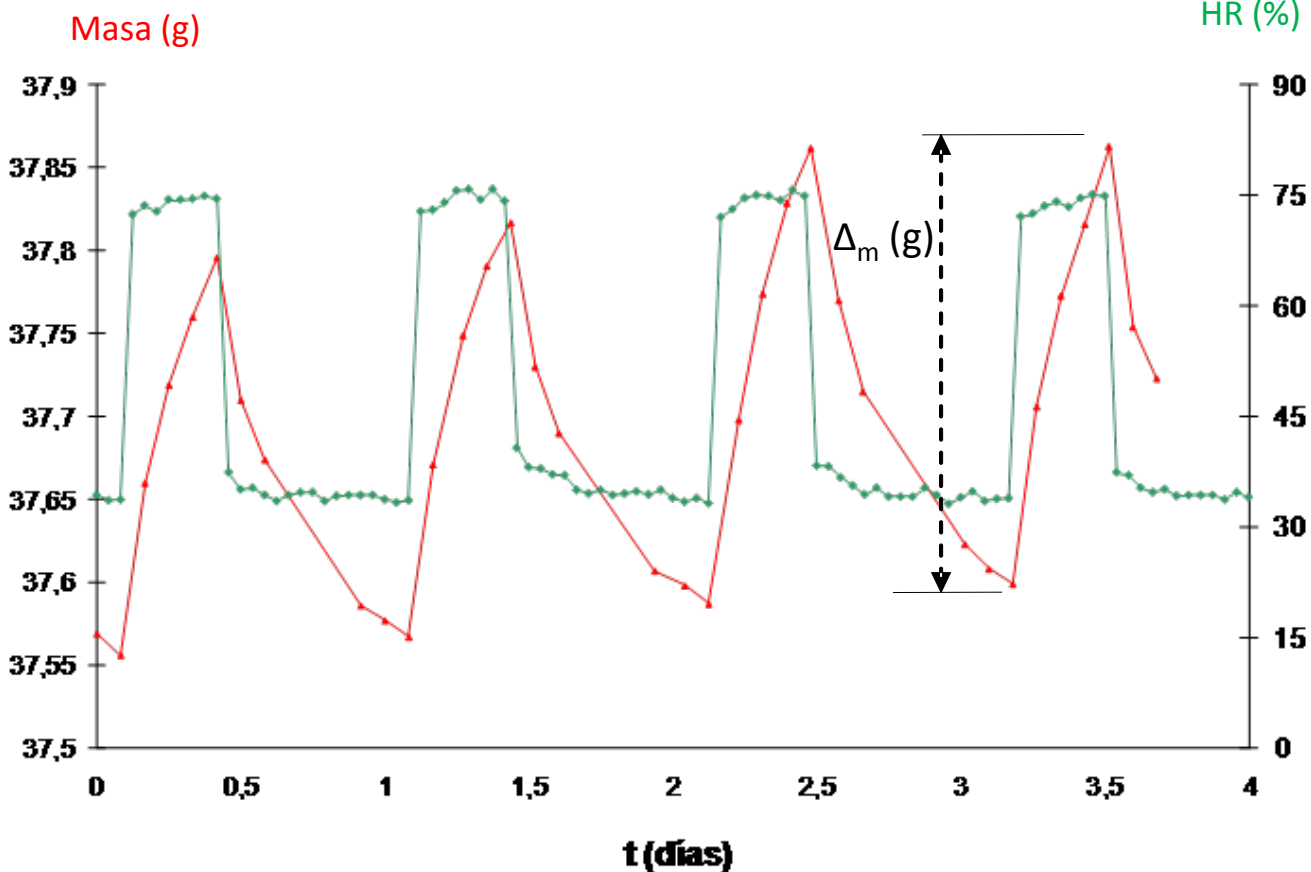
Reference: Gómez-Arriaran, I. 2006. Caracterización higroscópica de materiales de construcción: Arcilla aligerada y picón (Doctoral dissertation, ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones de Bilbao)

- **Cálculo del MBV teórico:** a partir de propiedades higroscópicas
  - Requiere caracterización higroscópica:

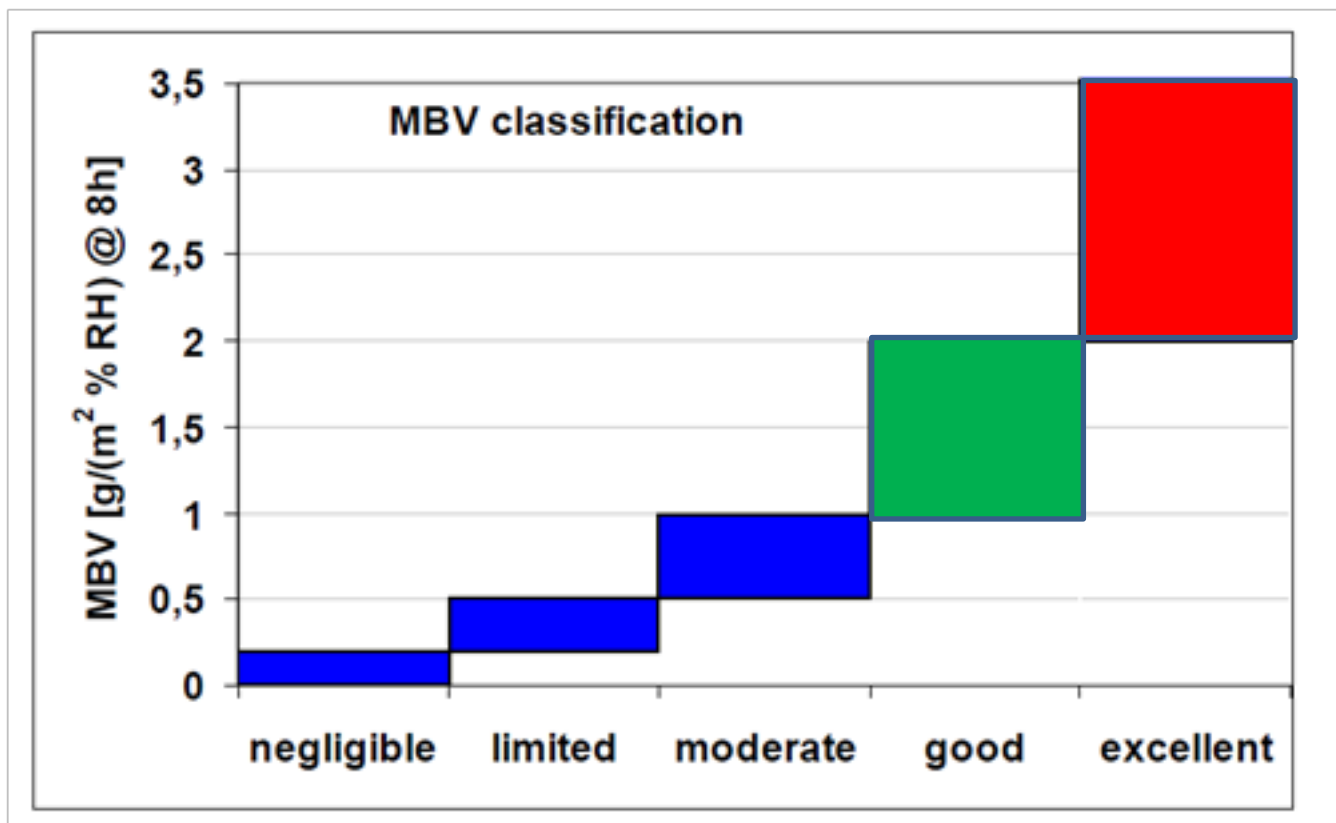




- Medición del MBV real:  
a partir de ensayos dinámicos

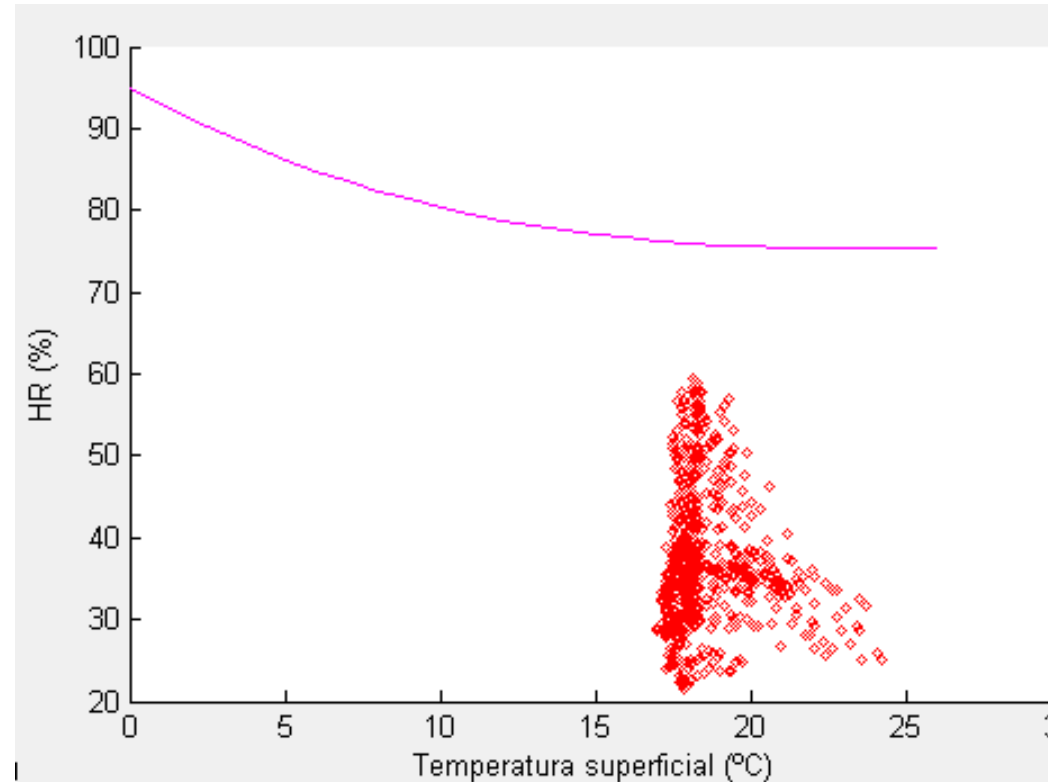


Clasificación de materiales según su potencial de amortiguamiento de humedad.

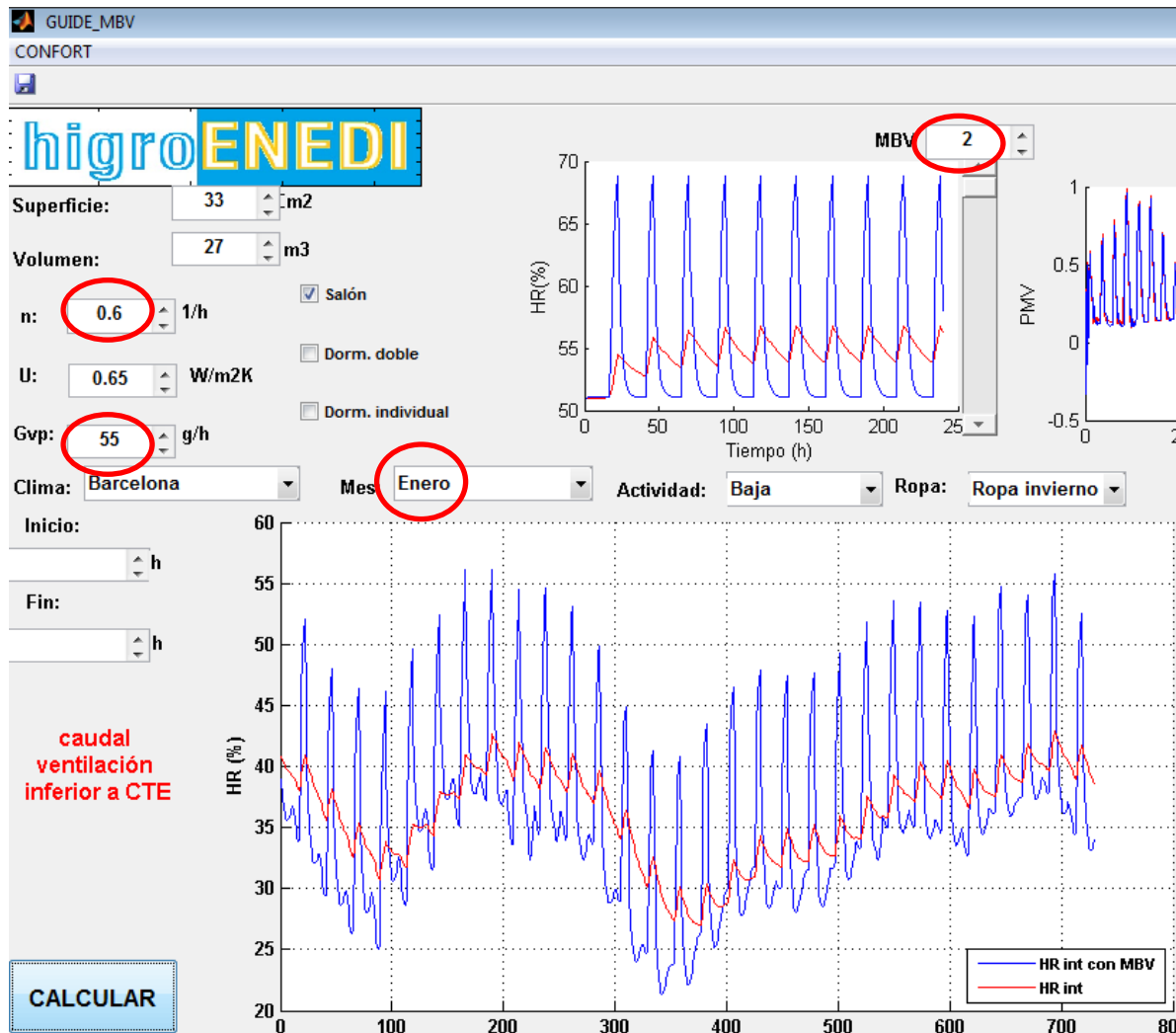


MATERIAL	$\Delta HR$ (%)	Ciclos	MBV [g/(m <sup>2</sup> ·%RH)]
Poliacrilato de sodio	33-75	8-16h	8,97
Celulosa	33-75	8-16h	3,07
Enlucido de yeso (sin pintar)	65-75	12-12h	2,7
Enlucido de cemento (sin pintar)	65-75	12-12h	1,61
Cerámica puzolánica autoclavada	33-75	8-16h	1,34
Enlucido de yeso	65-75	12-12h	1,30
Placa de yeso laminado	65-85	12-12h	1,25
Tablero de abeto	33-75	8-16h	1,16
Enlucido de yeso	65-85	12-12h	1,13
Yeso	33-75	8-16h	1,06
Hormigón celular	33-75	8-16h	1,04
Madera de abedul	33-75	8-16h	0,85
Enlucido de cemento (pintura común 1)	65-85	12-12h	0,815
Enlucido de cemento (pintura común 2)	65-85	12-12h	0,765
Hormigón de áridos ligeros estucado	33-75	8-16h	0,75
Madera contrachapada	33-75	8-16h	0,73

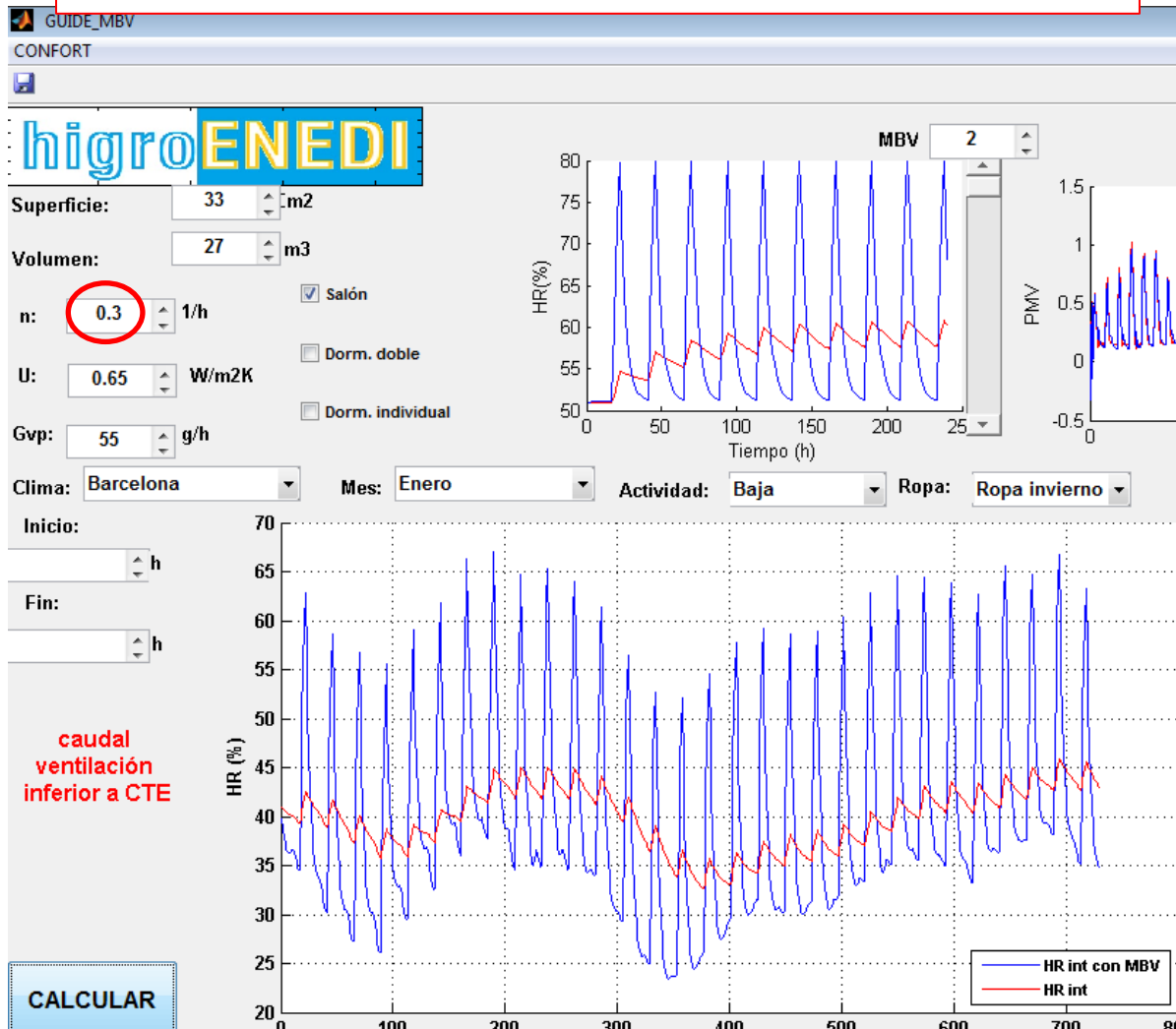
- EL PROBLEMA
- LAS ISOPLETAS
- LOS FACTORES
- LA SOLUCION PASIVA
- LA PREDICCIÓN
  - Simulaciones en régimen dinámico



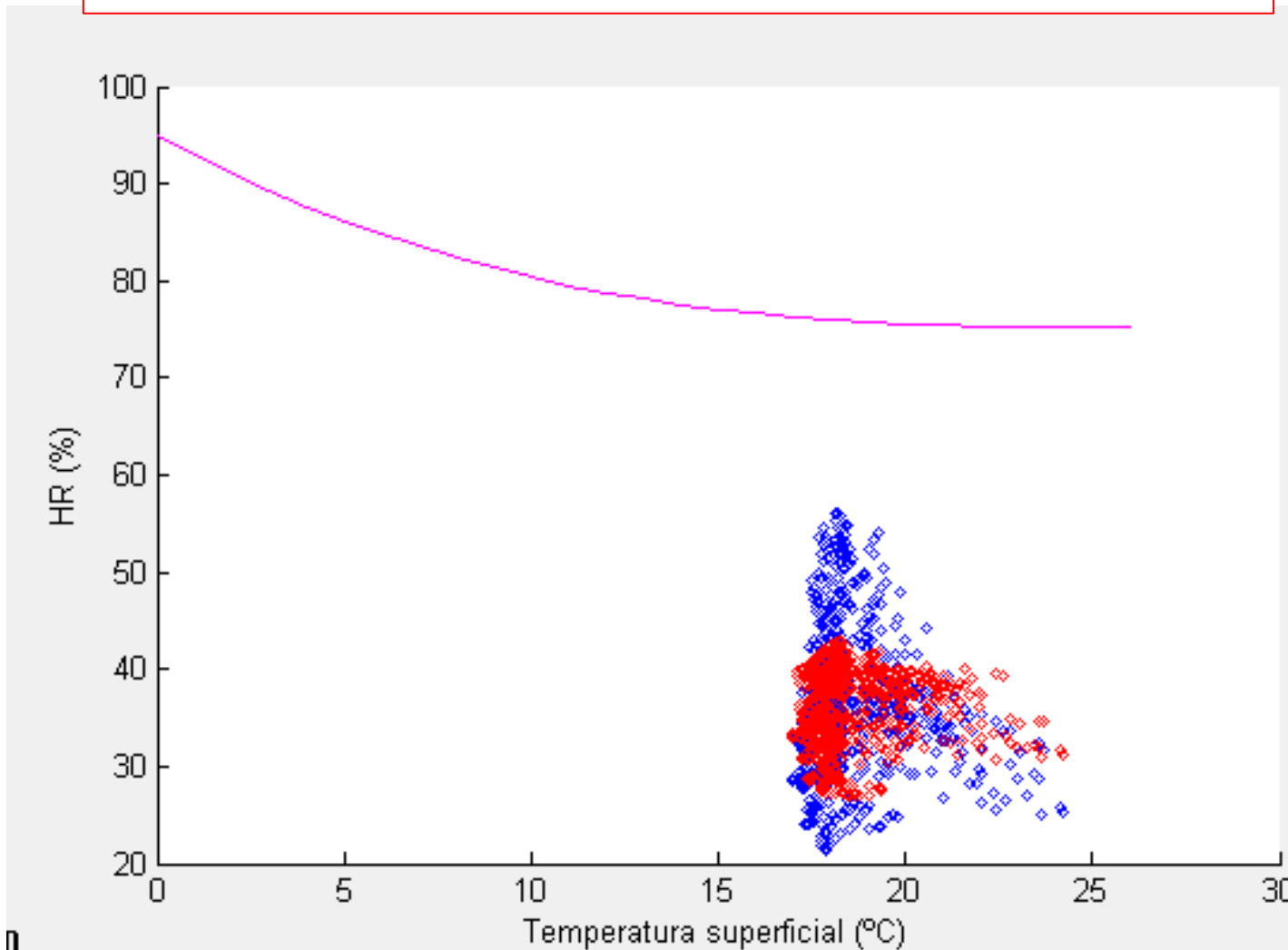
Barcelona, Enero,  $0.6 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



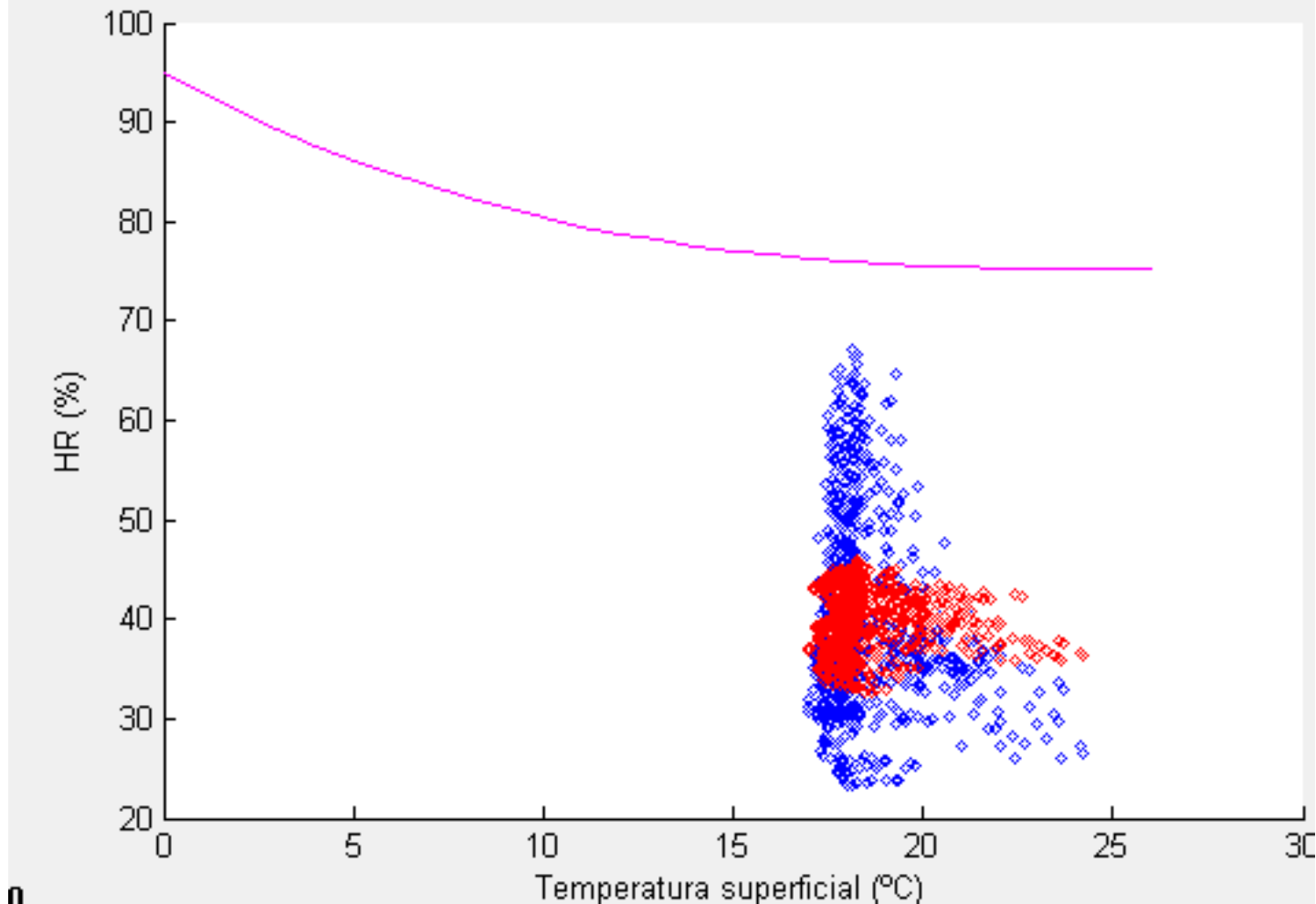
Barcelona, Enero,  $0.3 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



Barcelona, Enero,  $0.6 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$

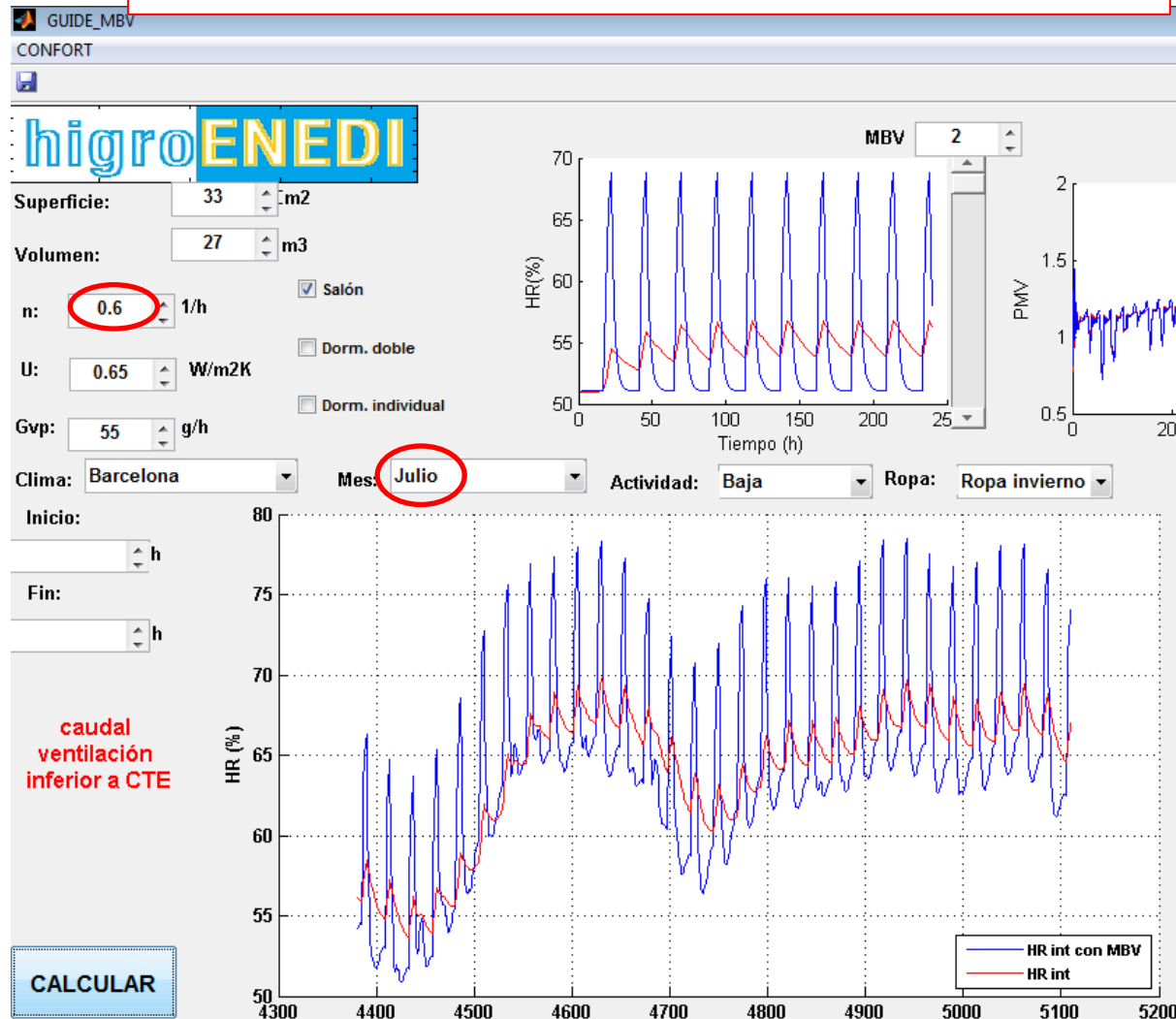


Barcelona, Enero,  $0.3 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$

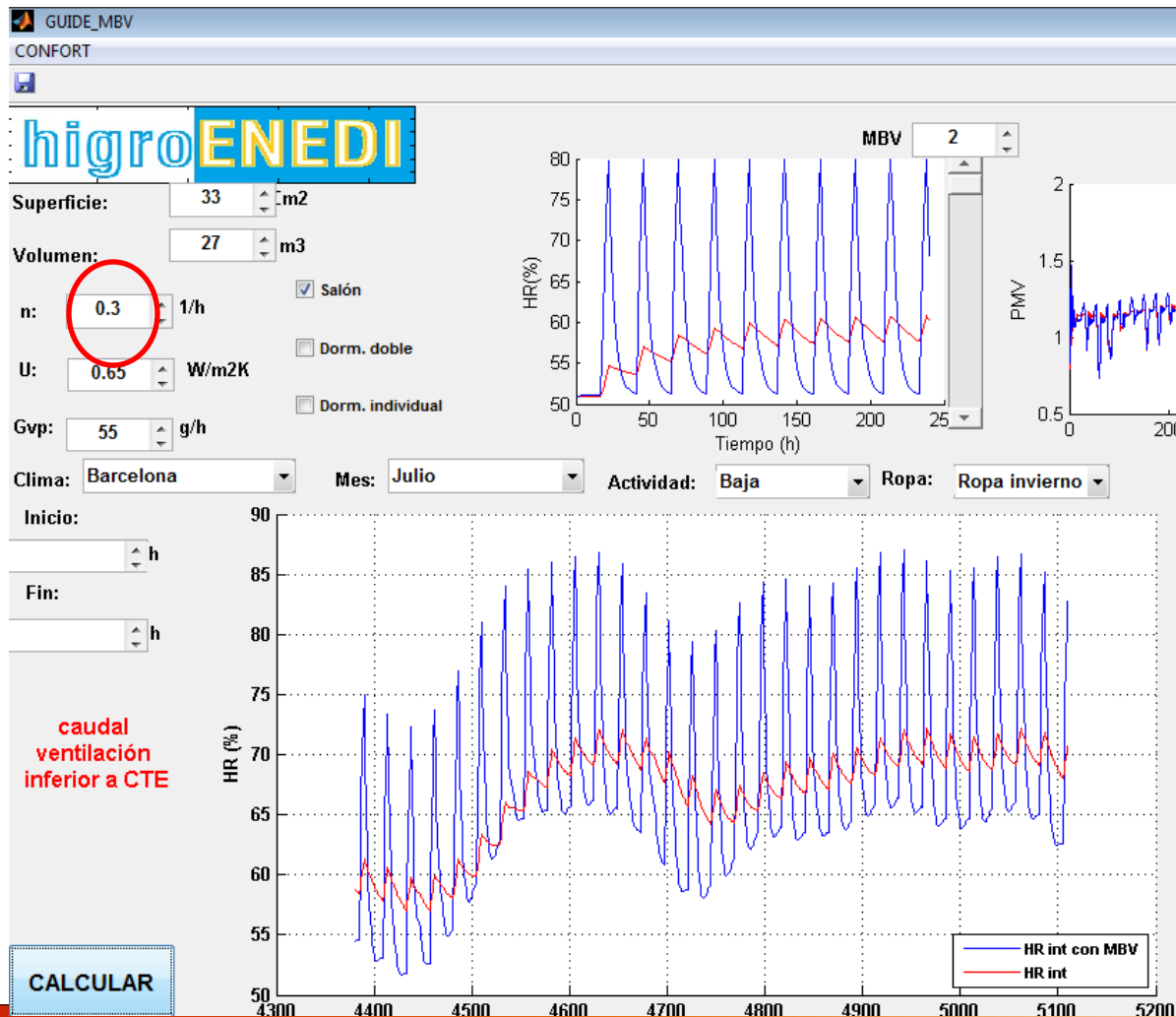




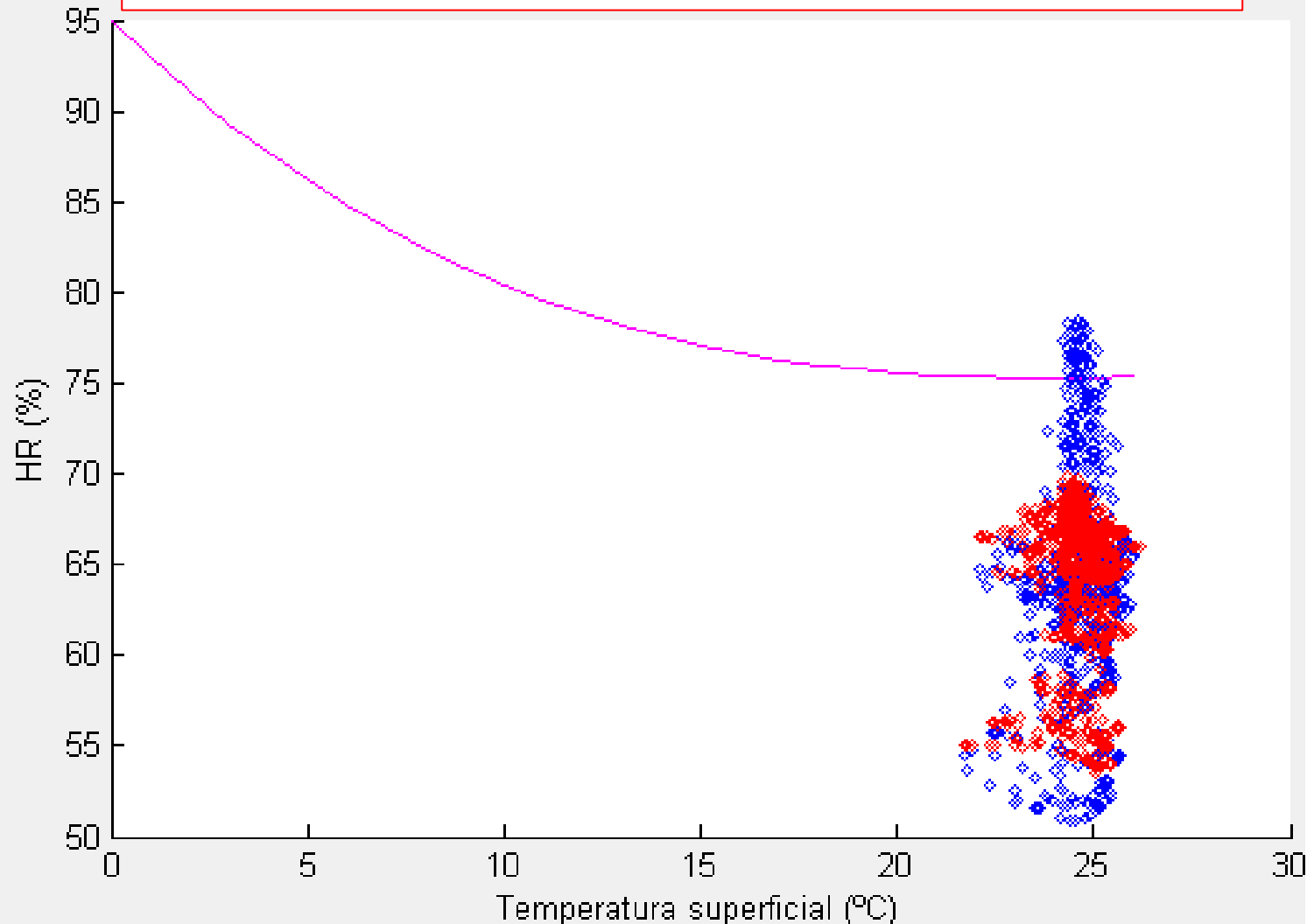
Barcelona, Julio,  $0.6 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



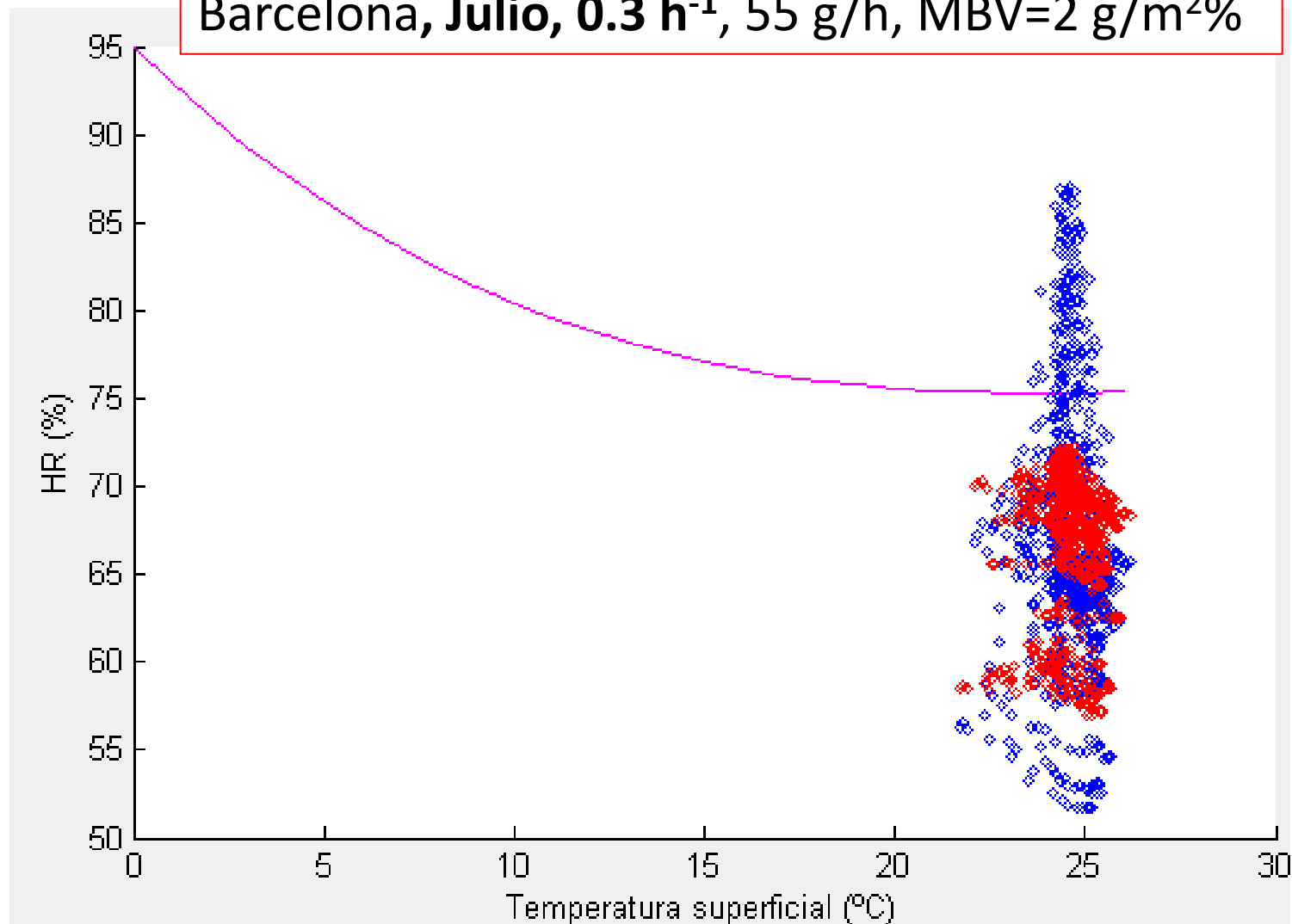
Barcelona, Julio,  $0.3 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



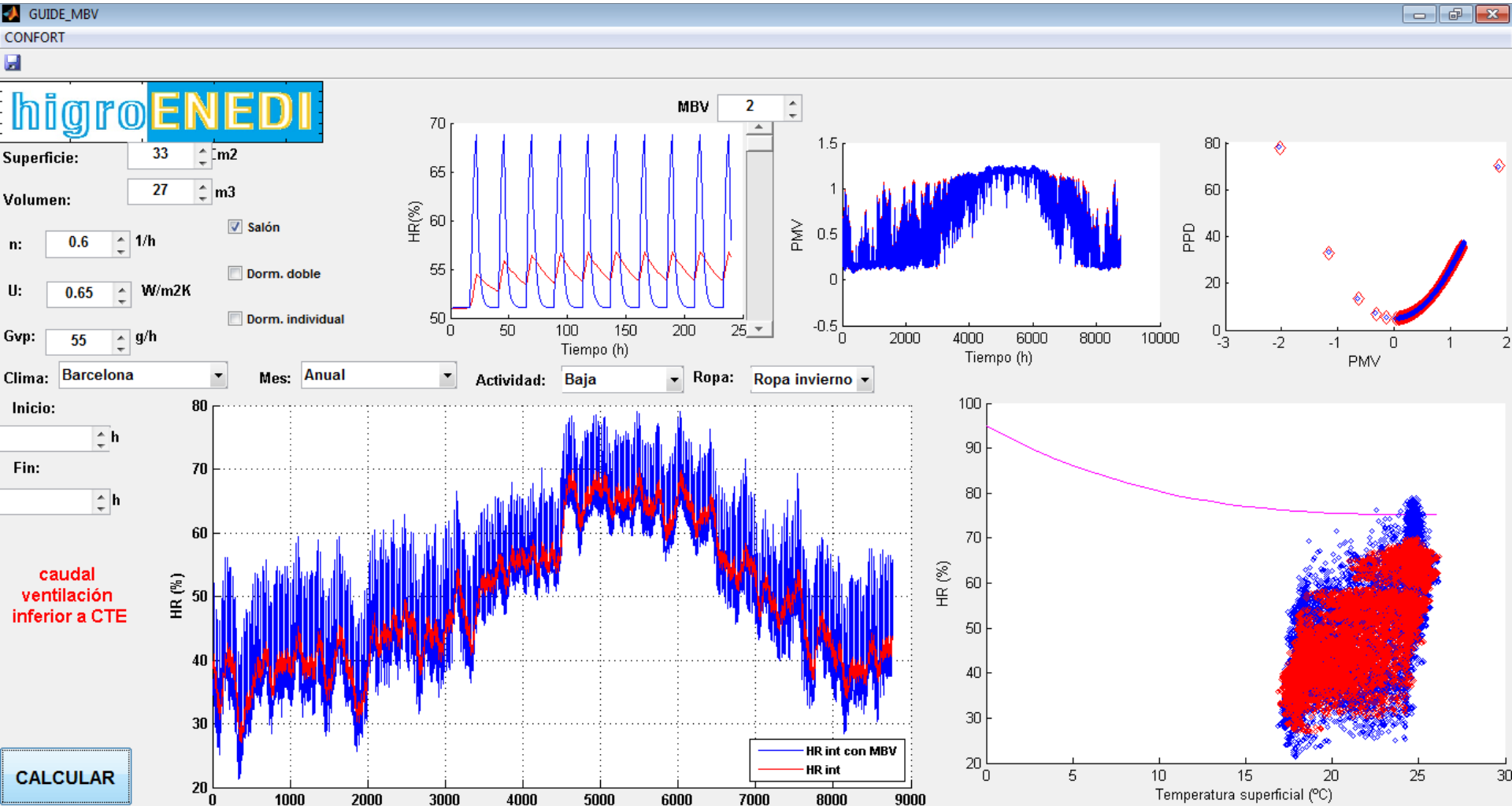
Barcelona, Julio,  $0.6 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



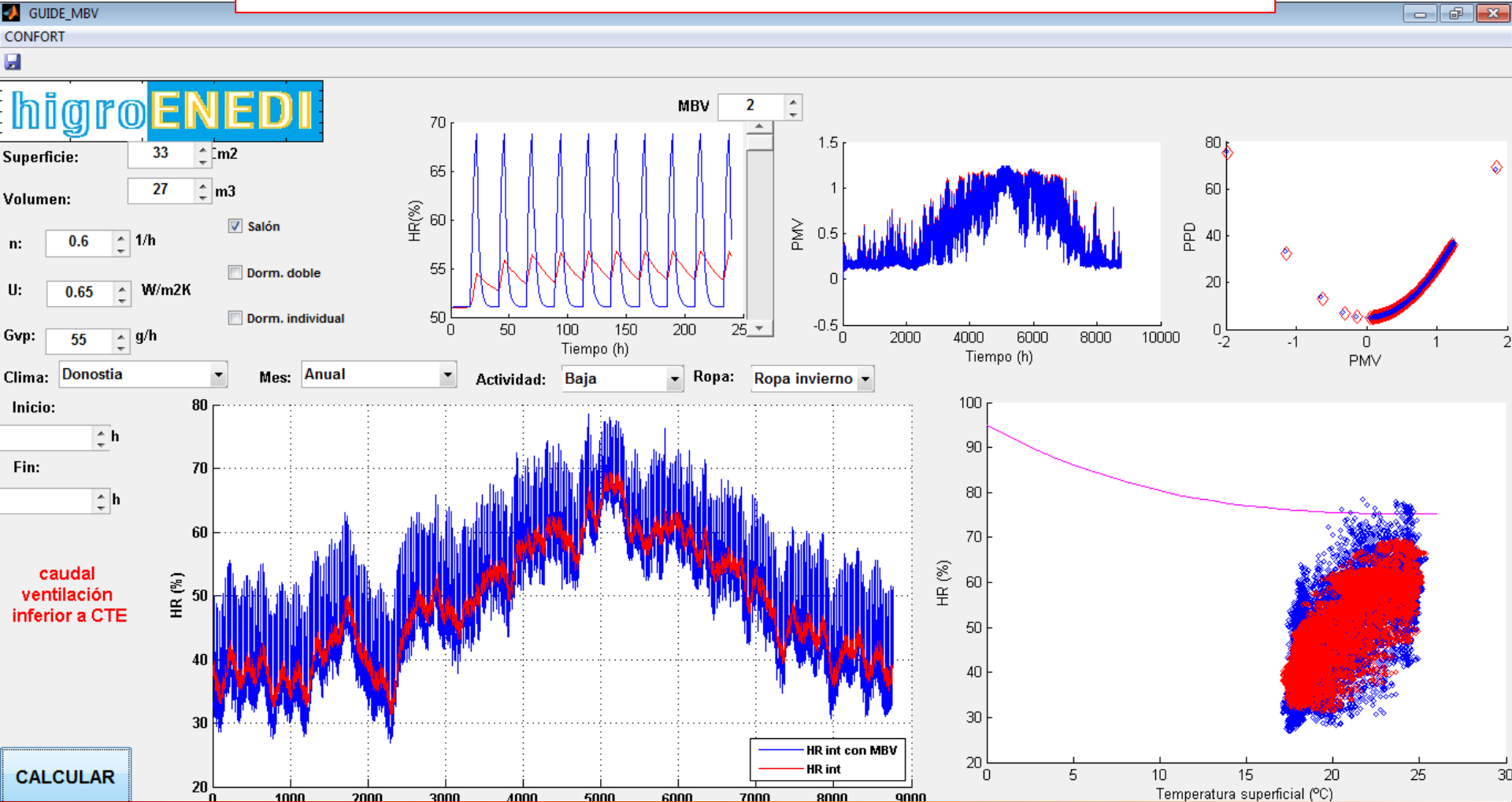
Barcelona, Julio,  $0.3 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



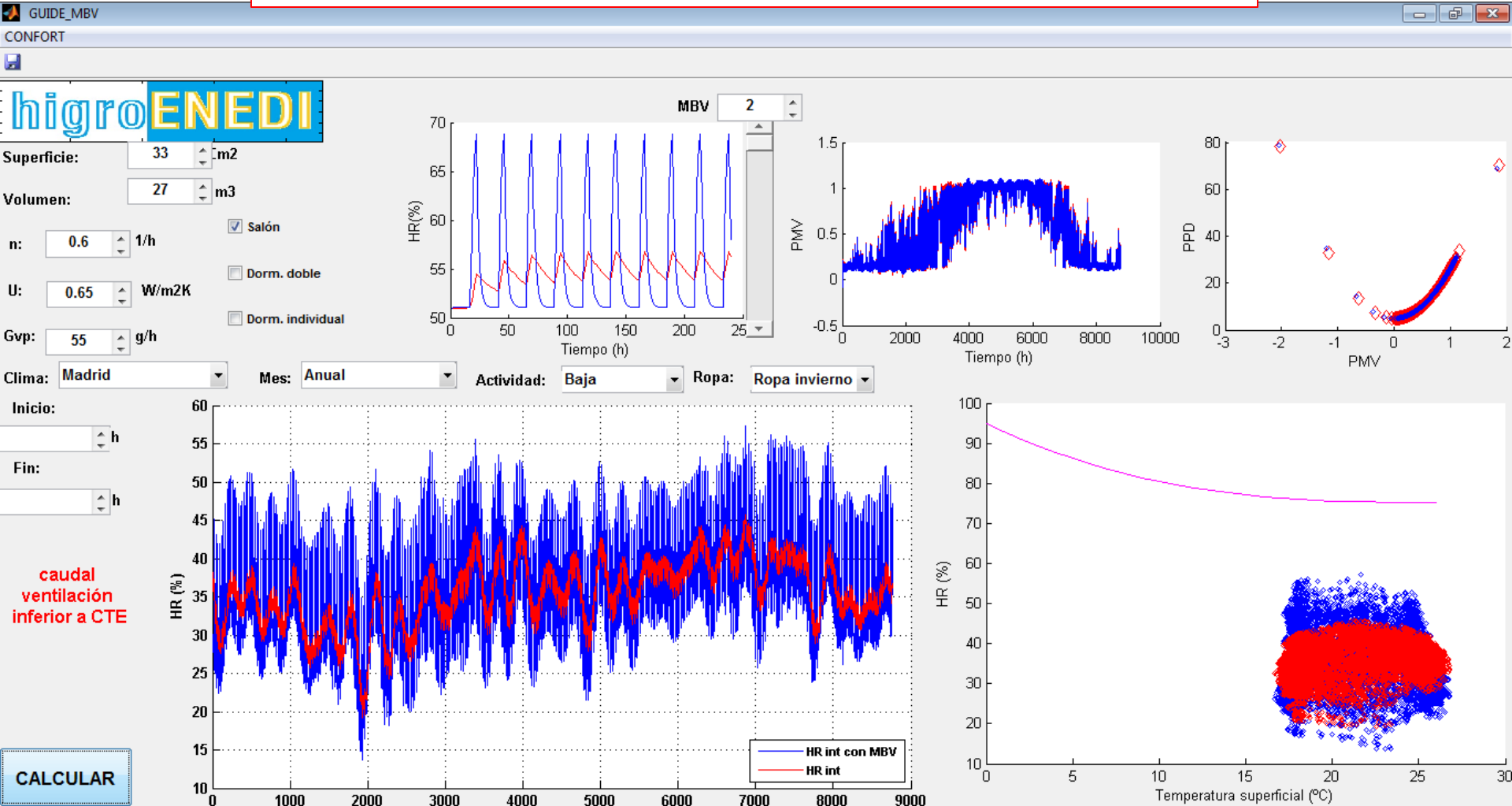
Barcelona, ANUAL,  $0.6 \text{ h}^{-1}$ ,  $55 \text{ g/h}$ ,  $\text{MBV}=2 \text{ g/m}^2\%$



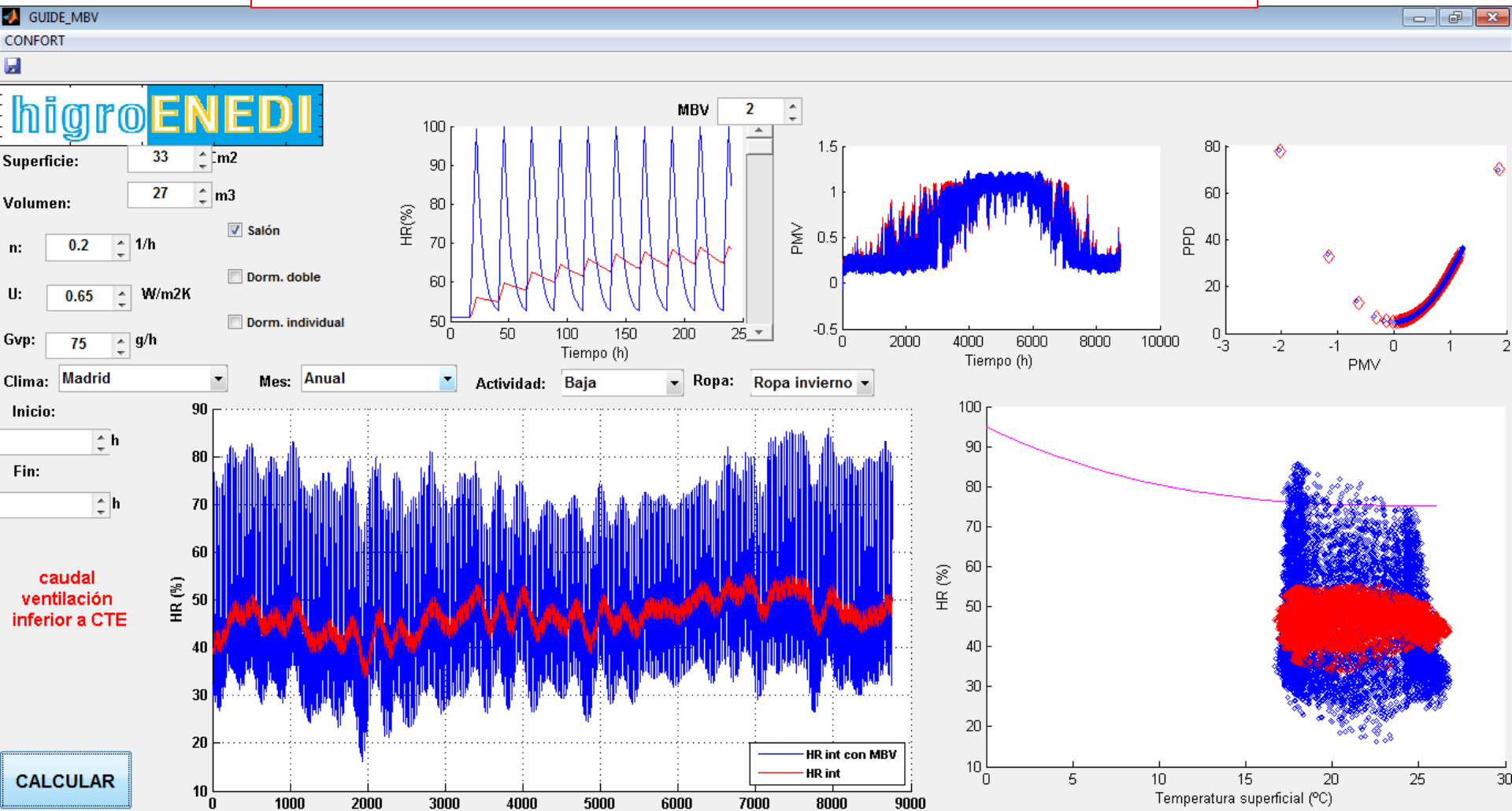
Donostia, ANUAL, 0.6 h<sup>-1</sup>, 55 g/h, MBV=2 g/m<sup>2</sup>%



Madrid, ANUAL, 0.6 h<sup>-1</sup>, 55 g/h, MBV=2 g/m<sup>2</sup>%



Madrid, ANUAL, 0.2 h<sup>-1</sup>, 75 g/h, MBV=2 g/m<sup>2</sup>%





- Reducción consumo energético

# Inercia higrotérmica

- Al igual que en edificios diseñados adecuadamente, con un favorable factor de utilización, la masa térmica puede reducir la demanda global de energía, y mejorar el confort térmico.
- Del mismo modo, el uso de materiales con **alto MBV permite regular los picos de humedad relativa interior** al ser absorbidas las cargas de humedad por la envolvente del edificio, **para ser restituidas como ganancias latentes favorables durante los períodos de baja humedad.**

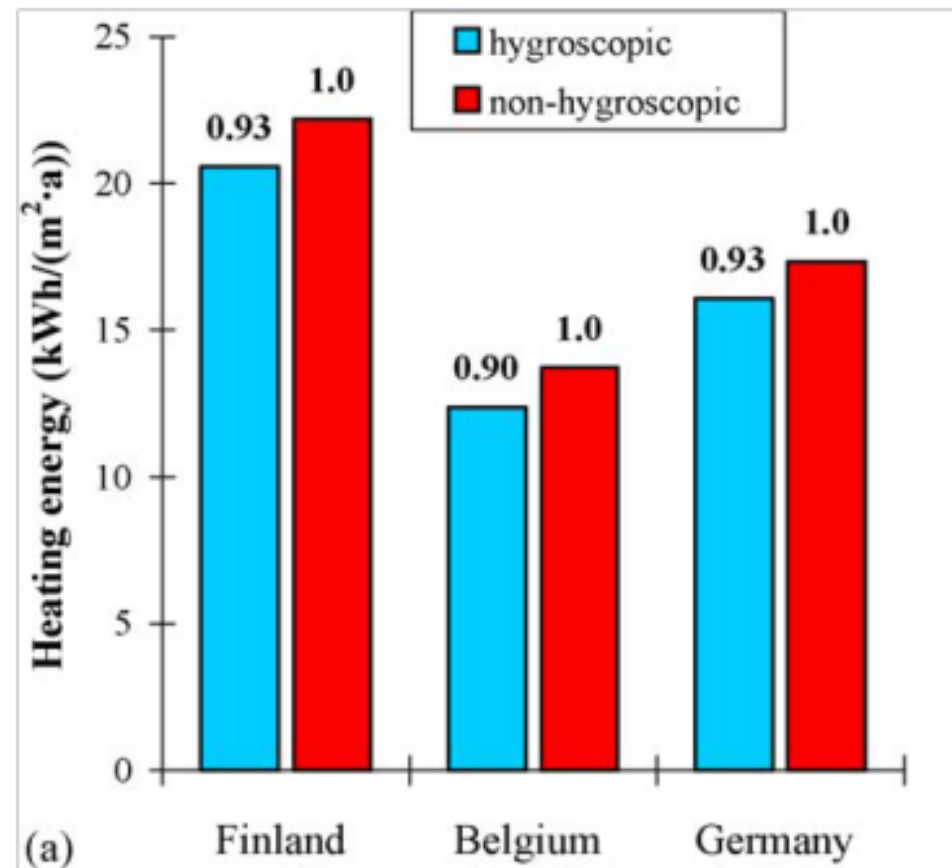
## Ahorro energético indirecto en refrigeración/calefacción:

Al mejorar las condiciones de humedad y con ello las condiciones de confort respiratorio y calidad del aire interior, es posible alterar la temperatura y la tasa de ventilación de edificios que utilizan materiales higroscópicos:

- Reducir tasa ventilación (15%)
- Reducir temperatura consignación invierno ( $\downarrow$  1.5 °C)
- Aumentar temperatura consigna verano ( $\uparrow$  2°C)

## Ahorro energético en calefacción:

El calor generado durante la adsorción de humedad en materiales de construcción higroscópicos disminuye el consumo de energía de calefacción durante la ocupación .

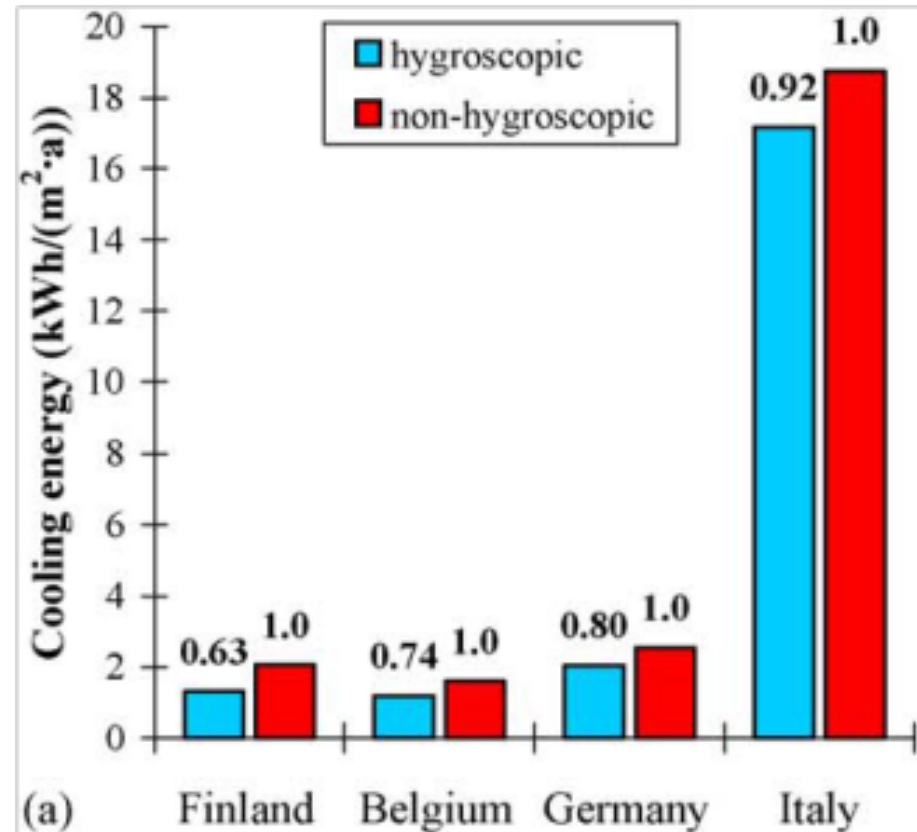


Fuente: Olalekan F. et al. Energy and Buildings 38 (2006) 1270–1282

## Ahorro energético en refrigeración:

La **disminución de la entalpía del aire** disminuye la energía necesaria para enfriar el edificio.

(la entalpía media del aire interior es cerca de  $2 \text{ kJ/kg}_a$  más baja durante la ocupación con materiales higroscópicos que con no higroscópicos).



Fuente: Olalekan F. et al. Energy and Buildings 38 (2006) 1270–1282

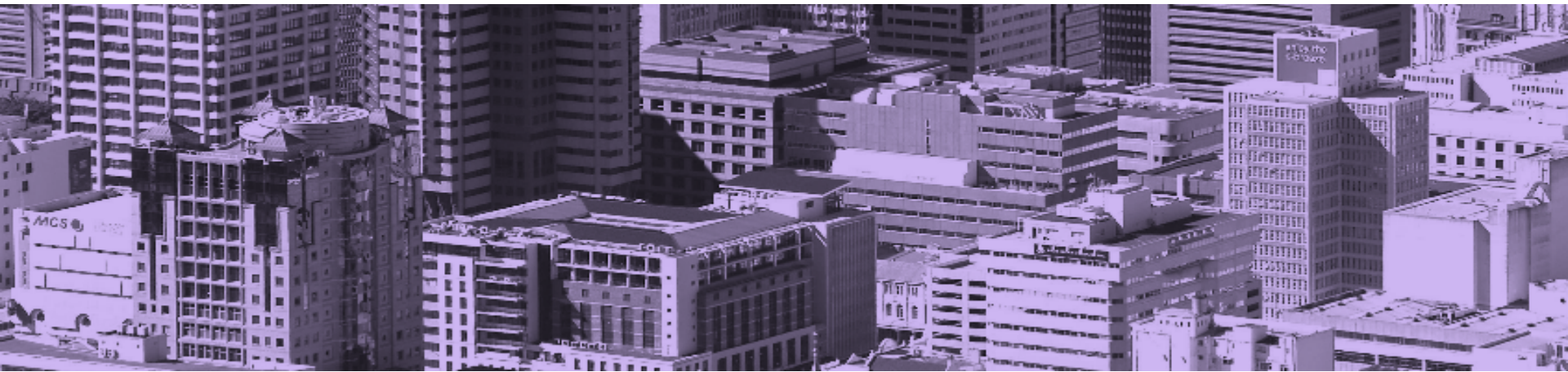
## Conclusiones:

- Necesidad de desarrollar materiales higrotérmicos para la regulación pasiva de la humedad relativa interior
  - aplicación en edificios de oficinas con relativamente altas cargas de humedad durante el día
  - en museos, archivos documentales, galerías de arte, bibliotecas, y también para el patrimonio arquitectónico (por ejemplo, edificios históricos que permitan acceso de los visitantes), donde los elementos que se exhiben o almacenan son sensibles a la humedad y pueden estar sometidos a variaciones periódicas en las cargas de humedad.
  - en edificios residenciales para evitar riesgo de condensaciones en condiciones de ventilación defectuosa



Gracias por su atención  
Eskerrik asko zuen arretagatik

<http://www.ehu.eus/enedi/>



[gomez.arriaran@ehu.eus](mailto:gomez.arriaran@ehu.eus)

943 01 7196

Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa – Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea