

Capítulo

3

**Materiales y
consideraciones
experimentales**

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se mencionan y analizan los materiales utilizados y los resultados de su caracterización. Asimismo se explican y detallan algunas de las consideraciones experimentales utilizadas para llevar a cabo la parte empírica de esta tesis doctoral. Lo anterior tiene como objetivo que la reproducibilidad de estos ensayos pueda hacerse independientemente del conocimiento a priori de este trabajo de investigación específico.

Como materiales utilizados se realizó un análisis y caracterización del cemento, áridos y aditivo químico polifuncional. Para el caso del agua se entiende que posee la pureza necesaria y especificada para la fabricación de hormigón preparado, por tal motivo no se realizó ningún análisis de tipo físico-químico o bacteriológico.

Para el caso de los trabajos realizados en laboratorio, básicamente se hicieron 4 estudios fundamentales sobre el hormigón y sus constituyentes, los cuales se enumeran a continuación:

- Ensayos con hormigón, donde se estudió el efecto de la temperatura ambiental sobre las prestaciones del mismo en estado fresco y endurecido
- Ensayos con áridos, donde se estudió el efecto de la temperatura ambiental sobre varias propiedades de los áridos con el fin de determinar su influencia sobre el comportamiento del hormigón
- Ensayos con morteros y pastas, donde se estudió también el efecto de las condiciones climáticas sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de morteros y pastas de cemento
- Finalmente, en base a una propuesta metodológica sobre la optimización del consumo de cemento en el hormigón, se realizaron estudios sobre hormigones sometidos a las condiciones climáticas de verano para verificar el buen funcionamiento de dicho planteamiento.

Dichas campañas experimentales fueron enfocadas desde un inicio al hormigón propiamente dicho y posteriormente sobre los constituyentes por separado, es decir, sobre las pastas, morteros y áridos. También se analizó la influencia de los aditivos sobre las propiedades de las pastas de cemento en estado fresco.

En este capítulo se explican las consideraciones experimentales tomadas en cuenta, principalmente las concernientes a las condiciones climáticas, también se describe el equipo utilizado. Esta información es la que se utilizó en todas las series experimentales, por lo tanto en los capítulos posteriores se hará referencia a este capítulo y no se mencionarán nuevamente.

3.2 MATERIALES UTILIZADOS Y SU CARACTERIZACIÓN

3.2.1 Cemento

Para la realización de todas las campañas experimentales se utilizó cemento Portland CEM I 42,5 R (Tipo I ASTM). La composición química y mineralógica así como algunas propiedades físicas y resistencias mecánicas se muestran a continuación en la **tabla 3.1**; esta información fue obtenida directamente de la ficha técnica del cemento facilitada por el fabricante.

Composición química (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.F.*	Cl ⁻
19,45	5,33	3,24	63,86	1,97	3,20	0,15	0,85	1,95	0,00

Composición mineralógica (%)				
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Na ₂ O (equivalente)
62,60	8,52	8,65	9,87	0,71

Propiedades físicas			
Superficie específica Blaine (cm ² /gr)	Gravedad específica (kg/m ³)	Tiempo de fraguado inicial (min)	Tiempo de fraguado final (min)
3.340	3.150	145	195

Resistencia a compresión de mortero normalizado (MPa)		
1 día	2 días	7 días
19,0	31,4	46,5

Tabla 3.1.- Composición química, mineralógica y propiedades físicas del cemento

3.2.2 Áridos

Para la realización de las campañas experimentales se utilizaron áridos calizos machacados con clasificación granulométrica por tamaño de partículas de 12-20, 5-12, 0-5 y 0-2 mm.

Granulometría de los áridos

Para llevar a cabo la caracterización granulométrica de los áridos se procedió conforme a las normas [ASTM C702-98](#) y [ASTM C136-01](#); el análisis granulométrico detallado para cada clasificación de árido se incluye en el **Anejo A**. A manera de resumen, en la **Tabla 3.2** se muestra el análisis granulométrico realizado para los cuatro diferentes tipo de áridos estudiados.

Tamiz ASTM	Abertura tamiz (mm)	% que pasa 12-20 mm	% que pasa 5-12 mm	% que pasa 0-5 mm	% que pasa 0-2 mm
1 1/4"	31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19	95,2	100,0	100,0	100,0
5/8"	16	72,6	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	6,1	96,1	100,0	100,0
5/16"	8	2,1	90,8	100,0	100,0
No. 5	4	0,7	0,2	99,5	100,0
No. 10	2	0,6	0,0	79,9	99,0
No. 18	1	0,5	0,0	49,4	66,1
No. 35	0,5	0,4	0,0	29,1	40,2
No. 60	0,25	0,3	0,0	4,5	6,4
No. 120	0,125	0,1	0,0	0,6	0,7
No. 230	0,063	0,0	0,0	0,0	0,0
Fondo	0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 3.2.- Resumen granulométrico de los áridos

De igual forma, se presenta en la **figura 3.1** la gráfica correspondiente a la distribución granulométrica para todos los áridos.

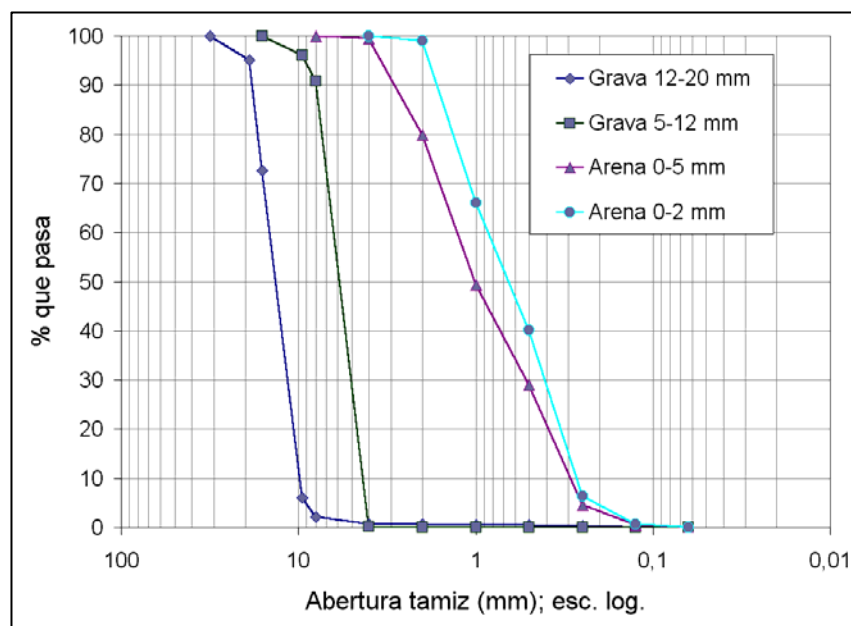


Figura 3.1.- Curva de distribución granulométrica de todos los áridos

Finalmente y a manera de resumen podemos mencionar que los áridos estudiados granulométricamente presentan tendencias uniformes y que corresponden a las curvas normalizadas para cada clasificación. En general se observan curvas muy bien graduadas y para el caso de las arenas el contenido de material fino es muy pequeño.

Propiedades físicas de los áridos

En la **Tabla 3.3** se muestran algunas propiedades físicas de los áridos como la absorción, la humedad y la densidad real. [ASTM C702-98], [ASTM C127-01], [ASTM C128-01], [ASTM C566-97]

Árido	12-20 mm	5-12 mm	0-5 mm	0-2 mm
Coefficiente de Absorción	0,37%	0,45%	1,60%	1,87%
% de Humedad	25%	31%	24%	17%
Densidad Real (gr/cm ³)	2,72	2,67	2,60	2,57

Tabla 3.3.- Distribuciones granulométricas y propiedades físicas de los áridos

3.2.3 Aditivo químico

El aditivo químico empleado en las campañas experimentales corresponde a un aditivo polifuncional en base a sulfonatos surfactantes. En la **tabla 3.4** se muestran algunas propiedades nominales de éste aditivo polifuncional brindadas por los fabricantes.

Propiedades nominales	
Base	Sulfonatos surfactantes
Aspecto físico	Líquido marrón oscuro
Densidad	1,18 ± 0,03 gr/cm ³
Contenido de sólidos	30 %
PH	7,50 ± 1,00
Dosificación recomendada por peso del cemento	0,4 – 1,2 %
Cloruros	< 0,1 %

Tabla 3.4.- Propiedades nominales del aditivo químico empleado

3.3 INSTALACIONES Y EQUIPO UTILIZADO

Para llevar a cabo la realización de las campañas experimentales de este trabajo se requería la simulación en laboratorio de las condiciones climáticas reales, es decir, de temperatura y humedad relativa. Físicamente, las instalaciones utilizadas están localizadas en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (LTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya, en Barcelona, y en las instalaciones de la empresa Cementos Molins Industrial, S.A. en Sant Viçens dels Horts.

En este apartado se describen las instalaciones y equipo utilizado para controlar y medir los aspectos térmicos en los materiales ensayados.

3.3.1 Características de la cámaras climáticas utilizadas y equipamiento de registros térmicos

Para la realización de las campañas experimentales, se utilizaron dos cámaras climáticas herméticas, la primera fue construida en las instalaciones de la empresa Promotora Mediterránea, S.A. (PROMSA) del Grupo Cementos Molins y la segunda fue instalada en el LTE de la UPC. Dichas cámaras climáticas son capaces de ser programadas para reproducir las condiciones ambientales específicas en base a los registros semi-horarios de temperatura y humedad relativa. En la cámara climática de PROMSA se llevaron a cabo las primeras campañas experimentales, posteriormente las demás se realizaron en la cámara climática de la UPC.

Para la obtención de los perfiles térmicos de los materiales estudiados se utilizaron sondas termopares conectadas a dos sistemas de adquisición de datos térmicos tipo “squirrel” y fueron embebidas en éstos. Por otro lado, en todas las ocasiones una sonda registró la temperatura ambiente en el interior de la cámara climática.

Cámara climática de PROMSA

En la **figura 3.2** puede verse un croquis en planta de la cámara climática utilizada en las instalaciones de PROMSA, con la distribución de los equipos y registros utilizados.

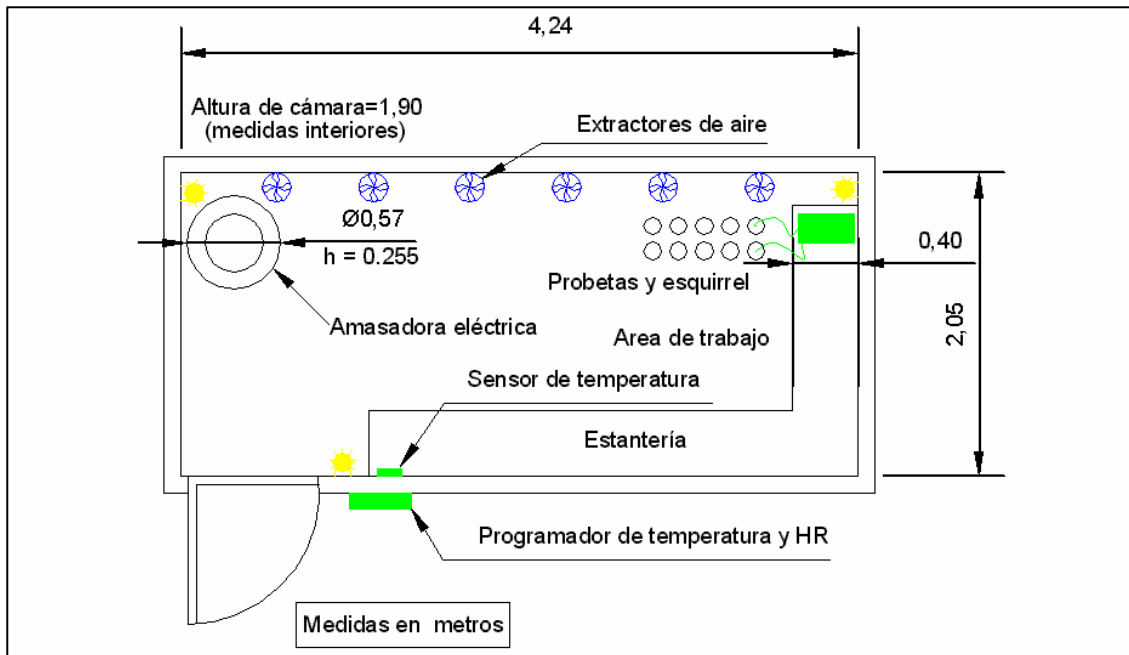


Figura 3.2.- Croquis de la cámara de PROMSA con la distribución de equipo

De igual forma, en la **figura 3.3** puede verse la entrada de la cámara climática utilizada y en la **figura 3.4** puede verse un detalle del panel externo de control.



Figura 3.3.- Entrada cámara climática



Figura 3.4.- Panel externo de control

En la **figura 3.5** puede verse un detalle de los dispositivos de adquisición de registros térmicos utilizados para la obtención de los registros térmicos de los materiales y de la temperatura ambiental.



Figura 3.5.- Disposición de los dispositivos para el registro de temperatura en probetas

Cámara climática del LTE de la UPC

En la **figura 3.6** y **figura 3.7** se presentan las fotografías de la entrada a la cámara climática y el panel externo de control, así como el ordenador utilizado en la cámara climática del Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC.



Figura 3.6.- Entrada cámara climática



Figura 3.7.- Panel de control y ordenador

3.4 SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS

Las pruebas de laboratorio son habitualmente realizadas a temperaturas controladas normalmente constantes (isotérmicas) de alrededor de 20 °C, por lo anterior, mucha de la información básica obtenida acerca de las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como endurecido está basada en el comportamiento del hormigón a éstas temperaturas. Sin embargo, en la práctica el hormigón es amasado y colocado a un amplio rango de temperaturas no isotérmicas y de igual forma permanece en funcionamiento a temperaturas variables. [Neville, 1999] Debido a esto, en este estudio se ha planteado la necesidad de conocer el comportamiento del hormigón en condiciones extremas de invierno y verano, asimismo tener una temperatura intermedia de referencia que en este caso se ha elegido de 20 °C (constante) y humedad relativa del 95% (constante) para comparar los valores y observar su variación y dispersión en función de esta temperatura de referencia o control.

3.4.1 Ciclos climáticos utilizados

Dado que para todos los ensayos realizados se ha planteado simular condiciones reales tanto climáticas como de producción se han tomado como referencia las condiciones climáticas de Barcelona en base a los registros de temperaturas aportados por el Observatorio Fabra del Servei de Meteorologia de Catalunya. [www.meteocat.com] Se ha seleccionado el observatorio de Barcelona debido a que es en el área urbana de Barcelona donde toma mayor parte la producción de hormigón y es en donde con mayor facilidad pueden hacerse mediciones directamente en planta, posteriormente se podrá utilizar la información climática de otras estaciones meteorológicas siguiendo la misma metodología aquí descrita.

Una vez establecida la base de medida, se ha considerado que los registros deberían corresponder a días de máximas y mínimas temperaturas. Para ello se ha hecho un análisis histórico de las temperaturas registradas en los últimos años, habiéndose concluido que los registros que mejor se adaptaban al estudio son los correspondientes al día 24 de Agosto del 2000 para temperaturas máximas y al día 23 de Diciembre de 2001 para temperaturas mínimas. El criterio seguido para seleccionar estas fechas fue en base a la información histórica de la temperatura media máxima y máxima absoluta, media mínima y mínima absoluta mensualmente desde el año de 1997.

En la **tabla 3.5** se muestran los registros de temperaturas programadas para el ciclo de condiciones de verano y para el ciclo de condiciones de invierno en función de los cuales se ha programado la cámara climática utilizada en los ensayos, asimismo se incluye la humedad relativa correspondiente a cada temperatura. Los registros se muestran cada media hora a lo largo del día.

Hora	Condiciones de Verano		Condiciones de Invierno		Hora	Condiciones de Verano		Condiciones de Invierno	
	Temperatura (° C)	Humedad relativa (%)	Temperatura (° C)	Humedad relativa (%)		Temperatura (° C)	Humedad relativa (%)	Temperatura (° C)	Humedad relativa (%)
0:00	22,5	85,0	2,8	53,0	12:00	35,0	45,0	6,5	69,0
0:30	22,5	85,0	2,8	53,0	12:30	35,0	45,0	6,5	69,0
1:00	23,0	91,0	3,3	57,0	13:00	36,5	34,0	6,4	66,0
1:30	23,0	91,0	3,3	57,0	13:30	36,5	34,0	6,4	66,0
2:00	22,8	96,0	3,1	66,0	14:00	36,4	32,0	5,8	70,0
2:30	22,8	96,0	3,1	66,0	14:30	36,4	32,0	5,8	70,0
3:00	24,3	69,0	3,1	65,0	15:00	36,5	37,0	5,4	72,0
3:30	24,3	69,0	3,1	65,0	15:30	36,5	37,0	5,4	72,0
4:00	25,9	51,0	3,4	69,0	16:00	34,2	38,0	5,0	73,0
4:30	25,9	51,0	3,4	69,0	16:30	34,2	38,0	5,0	73,0
5:00	27,0	43,0	3,9	65,0	17:00	32,1	39,0	4,8	75,0
5:30	27,0	43,0	3,9	65,0	17:30	32,1	39,0	4,8	75,0
6:00	28,5	30,0	4,1	72,0	18:00	28,6	49,0	4,8	75,0
6:30	28,5	30,0	4,1	72,0	18:30	28,6	49,0	4,8	75,0
7:00	30,3	26,0	4,6	78,0	19:00	25,5	68,0	4,6	75,0
7:30	30,3	26,0	4,6	78,0	19:30	25,5	68,0	4,6	75,0
8:00	30,9	28,0	5,6	78,0	20:00	23,7	76,0	4,9	70,0
8:30	30,9	28,0	5,6	78,0	20:30	23,7	76,0	4,9	70,0
9:00	32,7	27,0	6,0	80,0	21:00	23,3	86,0	3,9	70,0
9:30	32,7	27,0	6,0	80,0	21:30	23,3	86,0	3,9	70,0
10:00	34,6	25,0	6,2	75,0	22:00	22,6	93,0	3,1	73,0
10:30	34,6	25,0	6,2	75,0	22:30	22,6	93,0	3,1	73,0
11:00	38,0	19,0	6,8	72,0	23:00	22,6	91,0	1,5	80,0
11:30	38,0	19,0	6,8	72,0	23:30	22,6	91,0	1,5	80,0

Tabla 3.5.- Temperatura y humedad relativa programadas para ambas condiciones climáticas

A continuación se muestra en la **figura 3.8** en forma gráfica dichas distribuciones térmicas en función de la hora del día para cada una de las condiciones climáticas estudiadas.

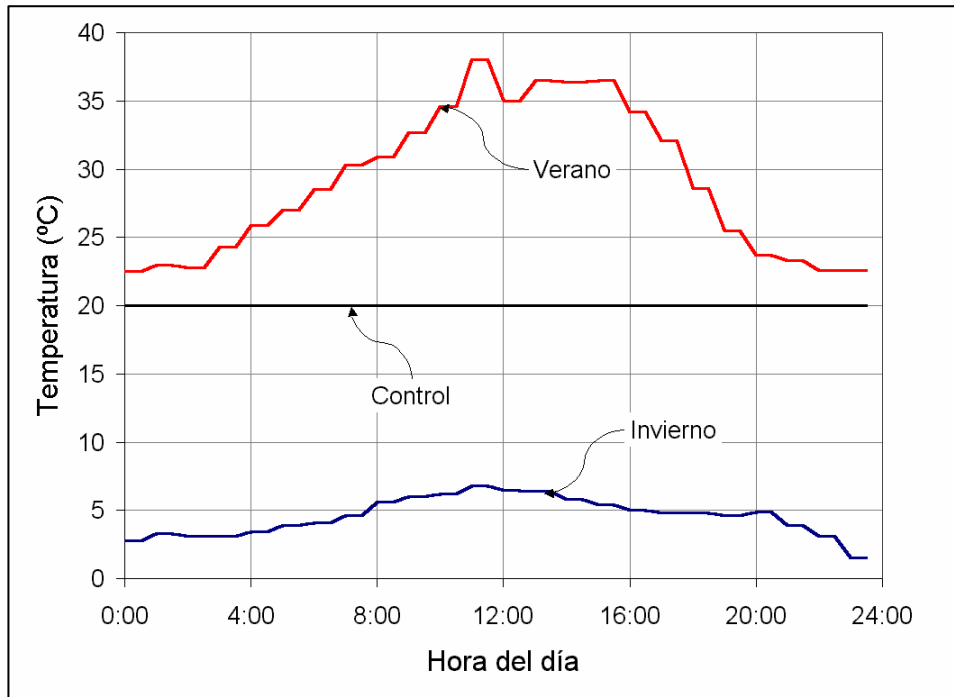


Figura 3.8.- Evolución de la temperatura a lo largo del día

Puede verse en las figuras anteriores que para el caso de las condiciones de verano la temperatura máxima alcanzada fue de 38,0 °C y la mínima de 22,5 °C y para las condiciones de invierno la temperatura máxima alcanzada fue de 6,5 °C y la mínima de 1,5 °C; las temperaturas medias son de 29,1 °C y 4,6 °C respectivamente. También puede apreciarse la clásica distribución sinusoidal a lo largo del día con una zona de máximos en el entorno de las 12 horas, mientras que la zona de mínimos se sitúa en el entorno de la medianoche. Por otro lado se observa que los gradientes térmicos entre los mínimos y los máximos son mayores para el caso de las condiciones de verano que para las de invierno.

De igual forma que para la temperatura a continuación se muestra la **figura 3.9** en donde se han graficado las humedades relativas para cada condición climática en función de la hora del día.

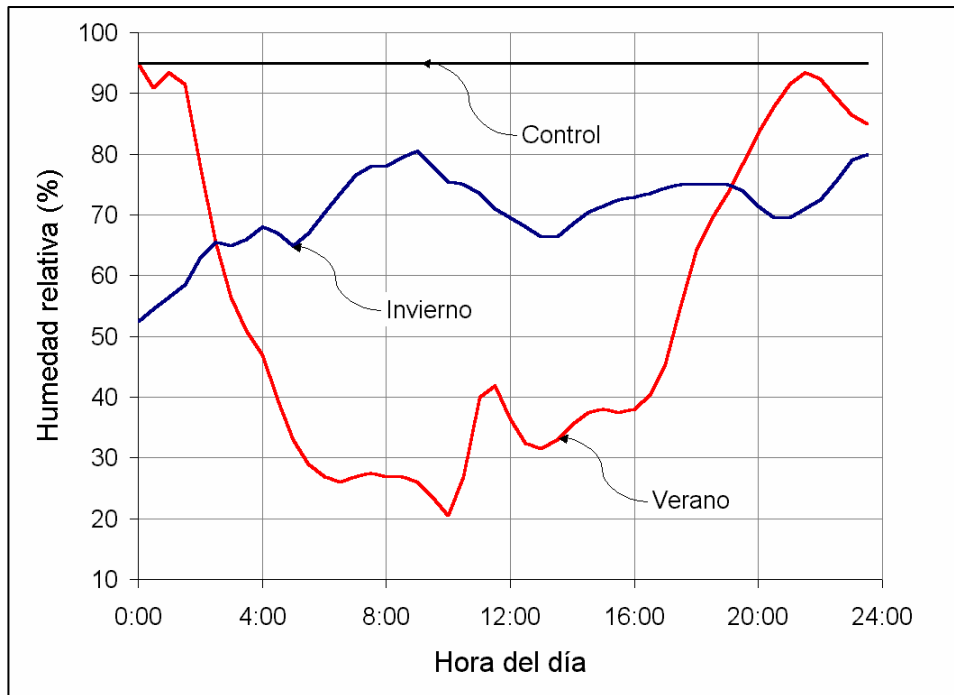


Figura 3.9.- Evolución de la humedad relativa a lo largo del día

Analizando la figura anterior, puede verse que la humedad relativa varía de forma inversamente proporcional a la temperatura, lo que significa que cuando la temperatura alcanza su nivel máximo la humedad relativa es menor y viceversa. De esta forma, los valores más bajos de humedad relativa para las condiciones de verano se tienen al mediodía mientras que los valores más bajos para el caso de las condiciones de invierno se presentan a primeras horas de la mañana. De igual forma, las variaciones entre los mínimos y los máximos son más marcadas para el caso de las condiciones de verano que para el caso de las condiciones de invierno.