



Determinación del índice de estrés térmico WBGT

durante la celebración del 20º Campeonato Europeo de Atletismo en Barcelona



Agradecimientos

Todo este trabajo no hubiese sido posible realizarlo sin la ayuda de muchas otras personas e instituciones, a las cuales les tengo que agradecer profundamente todo lo que han hecho

En primer lugar, al director del trabajo Dr. Ángel Redaño por su ayuda tanto en el terreno científico: dirigiendo el trabajo, corrigiendome los errores y aportando el material necesario, así como también como su ayuda a nivel personal.

También deseo agradecer al Servei Meteorològic de Catalunya, por facilitarme los datos de sus estaciones.

También a la Dra. M. J. Amor de la facultad de Biología por su tramitación para los lugares de ubicación (UB y UPF), así como para la ayuda de recogida de datos a la que ayudaron también Ma Isabel Larrea y Samuel Maseda Silva.

Tampoco querría olvidarme de Tomás Molina y Ma del Mar de Ritort de Tv3, que asimismo aportaron múltiples facilidades y sugerencias para poder realizar este trabajo Y esto sin olvidar al resto del equipo de Tv3 (Toni Nadal, Eloi Cordoní,...) de meteorología, que me guardaron toda la prensa del domingo y lunes, a fin de no perder ningún detalle de cuanto hubiese sucedido.

A su vez, no he de olvidar de la ayuda prestada por Miquel Bordera con todo lo que fueron ordenadores y adaptadores ni a Emili Serret de poder prescindir de mí, de unas actividades científicas con las que me había comprometido.

Y asimismo a Ma Isabel Larrea Clausell, a parte de la toma de datos, contribuyó en la corrección gramatical y al ser farmacéutica, me corrigió los temas clínicos, además de su soporte moral en todo este periodo de tiempo.

Y gracias al resto de personas y entidades que en el momento de hacer este escrito, me pueda olvidar, pero que durante este año me han ayudado en todo lo que han podido.

Índice

Introducción	3
1. Índice WBGT	8
1.1. El índice de estrés térmico	8
1.2. Cálculo del índice a partir de los datos de las estaciones meteorológicas	15
1.2.1. Cálculo de la t_g	15
1.2.2. Cálculo de la presión de vapor	16
1.2.3. Cálculo de la radiación directa	17
1.2.4. Cálculo de la altura del Sol	18
1.2.5. Pasos a seguir para calcular t_g	19
1.2.6. Cálculo de la t_N	19
2. Descripción del circuito	22
2.1. Climatología	22
2.2. Recorrido	23
3. Medida del índice	25
3.1. Descripción de los instrumentos de medida	25
3.2. Situación de los puntos de medida	27
3.3. Resultados	30
3.3.1. Maratón femenino	30
3.3.2. Maratón masculino	33
3.3.3. Superación de los valores umbrales del índice térmico WBGT	37
3.3.4. Comparativa con el estudio de Verdaguer-Codina et al. (1995a)	40
3.4. Relación entre las variables	42
3.4.1. Relación entre el índice térmico y el resto de variables	42
3.4.2. Cálculo de la temperatura del globo negro	48
4. Conclusiones	50
5. Bibliografía	51
Anexo 1 Tabla psiconométrica gráfica	56
Anexo 2 Programa para la resolución de la temperatura del globo negro	58
Anexo 3 Interficie del programa de grabación de datos	59
Anexo 4 Manual de instrucciones editado para todos miembros del grupo	60
Anexo 5 Programa 'unificacion.f'	64
Anexo 6 Lista oficial de corredores y sus tiempos (31 de julio)	66

Introducción

Este trabajo ha sido motivado por los realizados por Verdaguer et al. (1995a) sobre las medidas del índice térmico que realizó en la prueba del maratón de las olimpiadas de Barcelona 1992. El hecho de que los Campeonatos Europeos de Atletismo del año 2010 se celebraran también en verano ha sido una de las razones que motivó este estudio, a fin de hacer una valoración comparativa. El maratón olímpico tuvo lugar el 9 de agosto y, aunque una buena parte de la carrera transcurrió fuera de la ciudad, las medidas del índice de estrés térmico fueron realizadas en una calle de Barcelona perpendicular al mar; lo que ha permitido compararlos con las realizadas por nosotros en este estudio.

Aunque no es un índice demasiado utilizado en el norte de Europa ya que pocas veces unas condiciones meteorológicas que hagan superar los umbrales de riesgo.

Se han buscado asimismo formas en las que, con los datos meteorológicos disponibles en cualquier estación dotada según dispone la Organización Mundial de la Meteorología (WMO, 2008), se pudiera hacer el cálculo del índice e incluso buscar alguna manera de aproximarnos al valor de la radiación solar, aún teniendo el conocimiento de que ésta se mide en pocas estaciones. Por todo ello, a la hora de buscar bibliografía el criterio empleado se ha basado en estos parámetros; dado que no en todas las maratones se puede disponer de una estación con estos datos, ni mucho menos se pueden medir en cada punto.

Verdaguer et al. (1995b), sabiendo que en el maratón de los Juegos Olímpicos de Barcelona se iban a superar los valores umbrales de este índice térmico límites, quisieron comprobarlo midiendo el índice WBGT durante el transcurso de la prueba ya que el gran esfuerzo realizado por los atletas en estas pruebas puede desencadenar los mismos un fallo multiorgánico al que, si le sumamos el hecho de realizarlo en unas condiciones ambientales por encima de los parámetros biológicos óptimos, resultará ser un determinante de su rendimiento en la carrera; llegando en ocasiones a una situación límite. Aunque este hecho sucede con mayor frecuencia en atletas con escasa preparación física, los corredores profesionales, más entrenados, tienen conocimiento de las acciones a realizar al llegar a esta situación. Biológicamente este límite es debido al agotamiento total de las reservas glucídicas, cuya vía de obtención de energía es muy rápida. Sin embargo, dado que en este tipo de corredores aparece el agotamiento en un corto espacio de tiempo, el músculo

tiene que recurrir a las reservas lipídicas, cuya vía (la β -oxidación de los ácidos grasos) supone un número considerable de sucesivas reacciones químicas, lo que enlentece su rendimiento (Casado et al., 2010). Por este motivo en muchas publicaciones se resalta la conveniencia de realizar las pruebas de maratón al caer la tarde o incluso por la noche, hecho que no sucedió en este caso y ello indujo al presente estudio.

A continuación se presenta un breve resumen de la historia del maratón, a fin de situar al lector del trabajo.

El maratón tal como se conoce en la actualidad consiste en una carrera a lo largo de 42 km y 195 m. Esta prueba remeda la historia en que un soldado griego llamado Filípides, en el siglo V a.C., fue corriendo desde la llanura de Maratón (Μαραθών, Grecia) hasta Atenas para comunicar la victoria de los atenienses contra los persas (Hidalgo de la Vega et al., 1998). Otros autores aseguran que si fue corriendo fue para evitar el suicidio de todo el pueblo (Cano, 2010), que podía producirse en caso de pérdida de la batalla. La importancia de dicha batalla radica en que fue la primera que ganaba una ciudad griega continental contra los persas. Según se dice, en lo único que concuerdan todos los datos es en que al llegar, debido al gran esfuerzo realizado, murió de cansancio.

A este personaje se le describe como un correo ateniense (Enciclopedia Durvan, 1970), aunque también existe la leyenda que lo define como un soldado que había estado luchando todo el día. Corrió en un solo día 40 km, aunque López Donaire (2010) postula que se trató de 240 km. El motivo de ir corriendo y no a caballo, como sería lo lógico a fin de recorrer tal la distancia, era la problemática que presentaba el camino.

El hecho de que a un soldado se le encomendase tal proeza, a nuestros ojos, no tenía entonces nada de extraño; dados la naturaleza y el entrenamiento de éstos (Ruiz Costa, 1998).

Y la historia acaba cuando cae muerto al suelo, gritando, para la mayoría de autores: “¡Hemos vencido!!!” (Historiadelatletismo.net 2008); aunque Ruiz Costa (1998) asegura que gritó “Nike”, diosa de la victoria.

Existen otras leyendas sobre el motivo de tal recorrido: una de ellas, en la que se dice que, en realidad, fue porque sabía que al día siguiente morirían los hijos en caso de pérdida de la batalla. Asimismo hay autores que afirman que el motivo de la carrera fue pedir ayuda a Esparta (Maratón Quijote, 2011; Ruiz Costa, 1998).

Todas estas leyendas se sitúan en el contexto de la época griega, concretamente en el siglo V a.C.; en que tuvieron lugar tres guerras entre los atenienses y los persas, llamadas Guerras Médicas (Pericot, 1931).

Durante la primera guerra Médica, los atenienses necesitaban la ayuda de Esparta para combatir a los persas; por lo que mandaron a Filípides a tal fin. Los persas, con Darío al mando, tenían la intención de atacar en el llano de Maratón a fin de luchar contra el ejército ateniense, muy reducido; y, bordeando la costa, invadir Atenas por el sur dado que estaría desprotegido. Sin embargo los atenienses, al enterarse de la negativa de los espartanos a prestarles ayuda, decidieron atacar a los persas primero.

Los persas, ante su valentía fueron a atacar el sur; pero los atenienses, previéndolo y tras luchar durante todo el día, fueron hacia el sur recorriendo 40km. El enemigo, que creía que la playa estaría desprotegida, se encontró allí al ejército. Entonces se retiraron creyendo estar ante un ejército de superhéroes (Ruiz Costa, 1998).

A raíz de la reinstauración de las olimpiadas a finales del siglo XIX, el primer maratón de la era moderna tuvo lugar concretamente el día 10 de Abril de 1896; con la participación de catorce atletas griegos y 4 extranjeros. En él se recorrió una distancia de 40 kilómetros, siendo el ganador un pastor griego llamado Spiridio Louis.

A partir de aquí el maratón se convirtió en la prueba que clausura cualquier competición de atletismo, como regla general, incluidos los JJ.OO. (Hegedüs, 2001). Pero en un principio fue sólo reservada a los hombres. Si bien la primera mujer en correr el maratón fue Stamis Rovithi y lo hizo por aquel tiempo, no le dejaron llegar a meta. Oficialmente no fue hasta 1920 (pero no en unos juegos olímpicos, sino en una popular de la ciudad de Chiswirck), que se permitió correr a las mujeres en el maratón (Barris, 2000).

Pero la distancia de 42.195 km se estableció por primera vez en los Juegos Olímpicos de Londres en 1908. Esto supuso un cambio de los 40 km habituales, aunque no fijos, a la actual distancia que ya no es entera, incluso en unidades inglesas. Para poder ver el rey Jorge V la llegada desde su palacio de Windsor, ordenó cambiar el trayecto de la carrera (Cano, 2010), quedando definitivamente aprobada esta distancia en los Juegos Olímpicos de París, en 1924 (Historia del Atletismo, 2008).

En España el primer maratón como tal se corrió de manera oficial en el año 1928 en Barcelona (RFEA, 2011).

Hay que señalar que ya en las olimpiadas de París del año 1900, se corrió a unos 39°C de temperatura (algunos dicen que fue entre 35°C y 39°C), (Martin & Gynn, 2004) y con una humedad alta; y muchos corredores abandonaron la carrera (sólo llegaron a meta 7 de los 39) o se perdieron por lo mal señalada y desorganizada que estuvo (Barris, 2000).

El maratón que analizó Verdaguer et al. en 1995, discurrió por un recorrido bastante diferente al nuestro, ya que en una buena parte transcurrió junto al mar, para acabar en el Estadi Olímpic de Montjuic. De ahí que se situasen en el passeig de la Zona Franca, al estar muy próximo tanto a la zona marítima como del final de la carrera, que era el principal objetivo de su estudio. En él no se dio vueltas a ningún circuito, sino que se salió de la ciudad de Mataró y se entró en Barcelona a mitad del recorrido.

Una vez dentro de la ciudad condal se corrió por las calles de la misma a fin de acabar en el Estadi Olímpic, lo que provocó que la pendiente final fuese muy importante; debido a que en el último kilómetro se pasó de una altura de 26m de plaça d'Espanya a unos 100 m de altura para entrar al estadio.

Verdaguer et al.(1995b), sabiendo que probablemente en el maratón de 1992 se iban a superar los umbrales del índice de estrés térmico, quiso comprobarlo, dado que meteorológicamente era muy probable y así lo demostró en su artículo.

Las mediciones obtenidas por los citados autores, con aparatos totalmente automáticos (Pujol, Verdaguer-Codina et al., 1991), fue una auténtica revolución e hizo que aumentasen mucho los artículos publicados a partir de éstos. En los casos mencionados empleaban aparatos automáticos como el usado en el presente estudio; pero bien es cierto que en Europa en los últimos años no se ha vuelto a utilizar este índice.

En este trabajo nos proponemos hemos buscado los medios para que, con ayuda de datos meteorológicos disponibles en cualquier estación se pudiera hacer el cálculo del índice e incluso buscar la manera de aproximarnos al valor de la radiación solar; a sabiendas de que ésta se mide en pocas estaciones.

1.- Índice WBGT

1.1 El índice de estrés térmico WBGT

Uno de los mayores retos que tiene actualmente la meteorología operativa en la predicción de situaciones adversas y la activación de protocolos para minimizar los efectos. Entre ellas, la predicción de las olas de calor y, en especial, aquellas en que se producen además humedades relativas extremadamente altas tiene una gran importancia para la polución (Fernandez-Raga, 2010)

Últimamente se han popularizado algunos índices, como el estrés térmico o el estrés por viento en caso de frío, ya que la gente es consciente de que no sólo influye la temperatura del aire sino también el viento y la humedad. Y se han extendido los consejos que se dan en situaciones de calor extremo recomendando protección de la acción directa del sol la reducción de la actividad en las horas de más calor.

El índice de estrés térmico WBGT (*Wet bulb globe temperature*, en castellano “índice de temperatura del globo negro y termómetro húmedo”) es el factor que relaciona las variables meteorológicas con el estrés térmico que padecen las personas en función de la actividad que hacen. Es un índice que, a diferencia de otros (por ejemplo, el índice de viento o el de calor), tiene en cuenta un buen número de variables. Incluye la humedad, el viento, la temperatura y la radiación (tanto directa del Sol como la infrarroja que emiten los cuerpos), así como el enfriamiento que sufre la persona por la emisión de IR. Su uso está recomendado para actividades que sean de larga exposición.

Este índice justamente refleja, a partir de estas variables meteorológicas, qué actividades son aptas y en cuáles ya se está en límites insoportables (bien sea por limitación de la evaporación del cuerpo, por humedad ambiental o por escasez de viento).

El WBGT se utiliza en diferentes países como medida legal, e incluso en España es un valor que la Inspección de Trabajo usa para medir la exposición de los trabajadores al calor y si éste les afecta negativamente a la salud o no. Se usa sobretodo el de medidas interiores.

Este índice no es muy usado a nivel europeo aunque está legislado en el ámbito deportivo (Saladié, 2008). No obstante, en otros países como Australia su servicio meteorológico (Bureau, 2010) publica de forma habitual en su página web los datos de WBGT en determinadas poblaciones, distinguiendo interior de exterior. También se calcula en Norteamérica, y en Cuba, donde están redactando una ley al respecto (Cuba, 2010). Este índice se rige también por la ISO 7726, así como una norma europea (UNE-EN 27726:1995).

En la legislación española y catalana no se habla explícitamente del WBGT, pero es uno de los valores que tienen en cuenta los jueces al tomar decisiones. Sobretudo en ambientes interiores y en exteriores se obliga a que la media horaria esté por debajo del valor establecido.

Por ejemplo en un ambiente con un índice de 28 y un individuo que realice un trabajo que requiera mucha fuerza (consumo metabólico superior a 260 W/m^2 de piel). Se le obligaría a hacer paradas con frecuencia, de forma que en total esté parado o sin hacer ejercicio el 50% del tiempo. Ese mismo consejo se debería aplicar a los deportes aunque por desgracia no se aplica, dado que no se mira.

En todos los casos, lo que se relaciona es el consumo energético respecto al índice. Con estas dos entradas se determina si se puede realizar o no tal actividad, o cuál debe ser el tiempo máximo que puede durar sin entrar en una situación que entrañe peligro. A mayor consumo metabólico, el índice límite es menor. Por ello se permite hacer cambios para bajar el consumo energético, como por ejemplo parar un rato en lugares frescos. Para dicho parámetro se calcula la media cada hora para las actividades en cuestión. Así se consigue rebajar el consumo medio y se eleva el límite del valor del índice de tolerancia. También influye si el individuo está aclimatado o no, dado que en el primer caso el cuerpo responde mejor que en el segundo y eso se tiene en cuenta a la hora de poner los límites. Se entiende por aclimatado a aquella persona que lleva 7 días expuesta al mismo estrés térmico.

Los valores WBGT se rigen según la tabla 1.1 (Saladié, 2008)

Tabla 1.1 Consumo metabólico en relación al valor máximo permitido del índice WBGT

Consumo metabólico (W/m ²)	Aclimatado	No aclimatado
$M < 65$	33°	32°
$65 < M < 130$	30°	29°
$130 < M < 200$	28°	26°
$200 < M < 260$	25° (26°)*	22° (23°)*
$M > 260$	23° (25°)*	18° (20°)*

* Valores entre paréntesis se refieren a actividades con viento superior a 0,75 m/s. La M se refiere al consumo metabólico que se define como la potencia ejercida dividida por la superficie de piel

Estos valores están calculados para que la persona no supere los 38°C de temperatura interna, dado que el ser humano es un animal de sangre caliente. Por tanto tiene una temperatura óptima, así como unos rangos de tolerancia. Además este índice es uno de los que mejor se adapta a la sensación meteorológica de la persona.

De hecho de éste índice, como se ha comentado anteriormente, existe la variante aplicable a ambientes exteriores y la correspondiente a ambientes interiores. En los exteriores interviene la radiación solar y en ausencia de ésta se reformula. En los exteriores se formula según la ecuación (Minard, 1961):

$$WBGT = 0.1t + 0.2t_g + 0.7t_N \quad (1.1)$$

siendo t la temperatura, t_g la temperatura del globo negro y t_N la temperatura natural. La temperatura natural es un índice más antiguo que se expresa como $t_N = t' + 0.021S - 0.42u + 1.93$ (Hunter y Minyard, 1999); siendo t' la temperatura del termómetro húmedo, S la radiación solar y u el viento. Las unidades de las variables son las del sistema internacional, salvo las temperaturas que son en grados Celsius. Por todo ello el WBGT se puede definir de la siguiente manera:

$$WBGT = 0,1t + 0,2t_g + 0,7t' + 0.0147S - 0.294u + 1.551 \quad (1.2)$$

mientras que en los interiores se calcula usando la siguiente ecuación $WBGT = 0.7t_N + 0.3t_g$

Cabe decir que la temperatura del globo negro es aquella que se mide en una esfera negra de 150 mm de diámetro, e intenta simular la temperatura que tendría en aquellas condiciones un cuerpo

negro perfecto, según lo define la termodinámica. En realidad tiene un error en la emisividad y en el albedo, de un 5% en ambos.

Aunque se asignan al WBGT por convenio unidades de grado Celsius, viendo la ecuación 1.2 podemos deducir que debería ser adimensional. Sin embargo incluimos los factores multiplicativos especificados en la fórmula (divididos por la unidad que corresponde en cada variable) con unidades de grado para poder expresarlo de tal forma.

También se han llegado a publicar unas tablas con entradas de temperatura y humedad como la de la siguiente tabla (tabla 1.2) (Bureau, 2010), que es aproximada (su aproximación es $WBGT=0.567t+0.393e+3.94$, siendo t la temperatura y e la presión de vapor del agua y omiten la radiación y el viento). En estos momentos en Japón ya se hacen predicciones del WBGT (Nies, 2010) para el día siguiente (sólo durante los meses de verano) en base a la salida de los modelos meteorológicos que tienen y haciendo los cálculos que explicamos en el apartado 1.3 u otros semejantes.

Tabla 1.2 Tabla de cálculo del índice entrando sólo humedad y temperatura

		Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) from Temperature and Relative Humidity																															
		Temperature (°C)																															
Relative Humidity (%)	0	15	16	16	17	18	18	19	19	20	20	21	22	22	23	23	24	24	25	25	26	27	27	28	28	29	29	30	31	31	32	32	
	5	16	16	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	27	28	29	29	30	31	31	32	33	33	34	35	
	10	16	17	17	18	19	19	20	21	21	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30	30	31	32	32	33	34	35	36	36	37
	15	17	17	18	19	19	20	21	21	22	23	23	24	25	26	26	27	28	29	29	30	31	32	33	33	34	35	36	37	38	39		
	20	17	18	18	19	20	21	21	22	23	24	24	25	26	27	27	28	29	30	31	32	32	33	34	35	36	37	38	39				
	25	18	18	19	20	20	21	22	23	24	24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39						
	30	18	19	20	20	21	22	23	23	24	25	26	27	28	29	29	30	31	32	33	34	35	36	37	39								
	35	18	19	20	21	22	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39									
	40	19	20	21	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39										
	45	19	20	21	22	23	24	25	26	27	27	28	29	30	32	33	34	35	36	37	38												
	50	20	21	22	23	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	36	37	39													
	55	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	34	35	36	37	38														
	60	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	35	36	37	38															
65	21	22	23	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	36	37	38																	
70	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	36	38	39	WBGT > 40																
75	22	23	24	25	26	27	29	30	31	32	33	35	36	37	39																		
80	23	24	25	26	27	28	29	30	32	33	34	36	37	38																			
85	23	24	25	26	28	29	30	31	32	34	35	37	38	39																			
90	24	25	26	27	28	29	31	32	33	35	36	37	39																				
95	24	25	26	27	29	30	31	33	34	35	37	38																					
100	24	26	27	28	29	31	32	33	35	36	38	39																					

Note: This table is compiled from an approximate formula which only depends on temperature and humidity. The formula is valid for full sunshine and a light winds

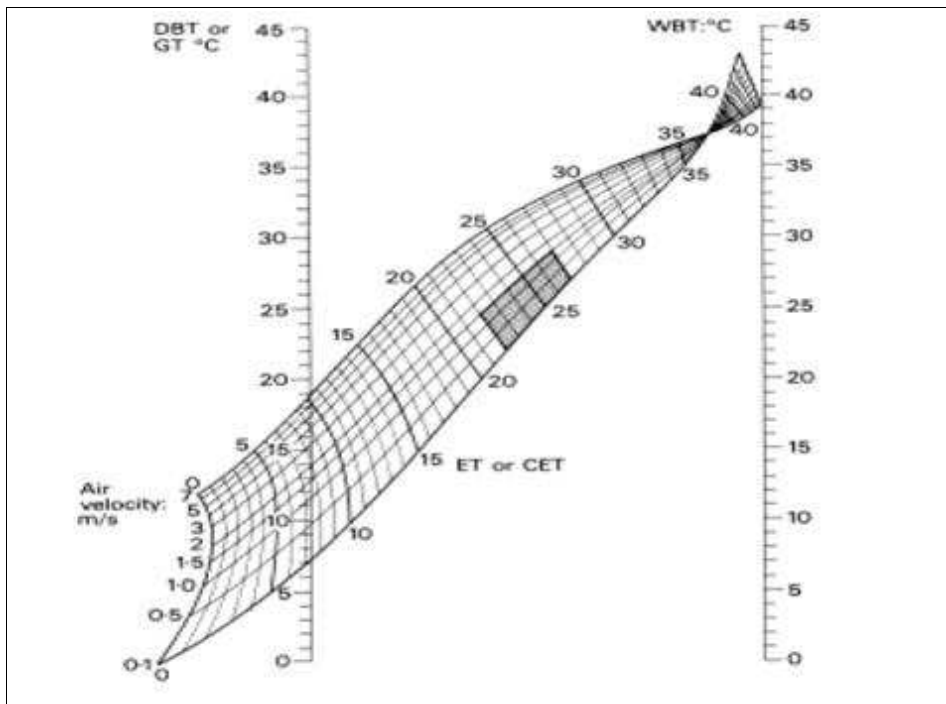
A nivel médico, sobre todo en la vertiente laboral, se usa este índice haciendo una media

entre las diferentes partes del cuerpo (por tanto, a diferentes alturas), así como una media de los diferentes lugares (y por tanto índices) y el tiempo que se está en cada uno de éstos.

El WBGT es uno de los muchos índices que intentan decir cual sería la temperatura que el cuerpo siente. Índices de este tipo ha habido muchos, de hecho se empezaron ya a desarrollar a partir del 1905 con la temperatura del termómetro húmedo (Haldane, 1905; Epstein, Moran, 2006).

El WBGT en sí se empezó a desarrollar a partir de unos estudios durante la Segunda Guerra Mundial (Schickele, 1947). A mediados de los 1950 se vio que se podía emplear también para usos civiles tales como el deporte al aire libre y de mucho consumo energético. Pero antes de éste, ya en 1923 se desarrolló la temperatura eficaz (ET) (Houghton, Yaglou, 1923; Epstein, Moran, 2006), que fue la precursora del WBGT. A ésta se le añadió, en 1932, el cálculo de la radiación y se llamó “temperatura efectiva (CET)” (Vernon, Warner, 1932 ; Epstein, Moran, 2006). Para trabajar con este índice, se usaba un diagrama (figura 1.1) en las que se entraban los valores de la velocidad del viento, la temperatura ambiente de los termómetros seco y húmedo.

Figura 1.1 Temperatura efectiva (CET)



El cambio de modelo fue debido a que el CET implicaba que un cierto personal se dedicase a medir los datos meteorológicos del viento y que supiesen usar las tablas. Así que se empezaron a buscar métodos para evitarlo. En la tabla 1.3 se muestran cuatro modelos propuestos entre 1954 y

1965.

Tabla 1.3 Modelos propuestos

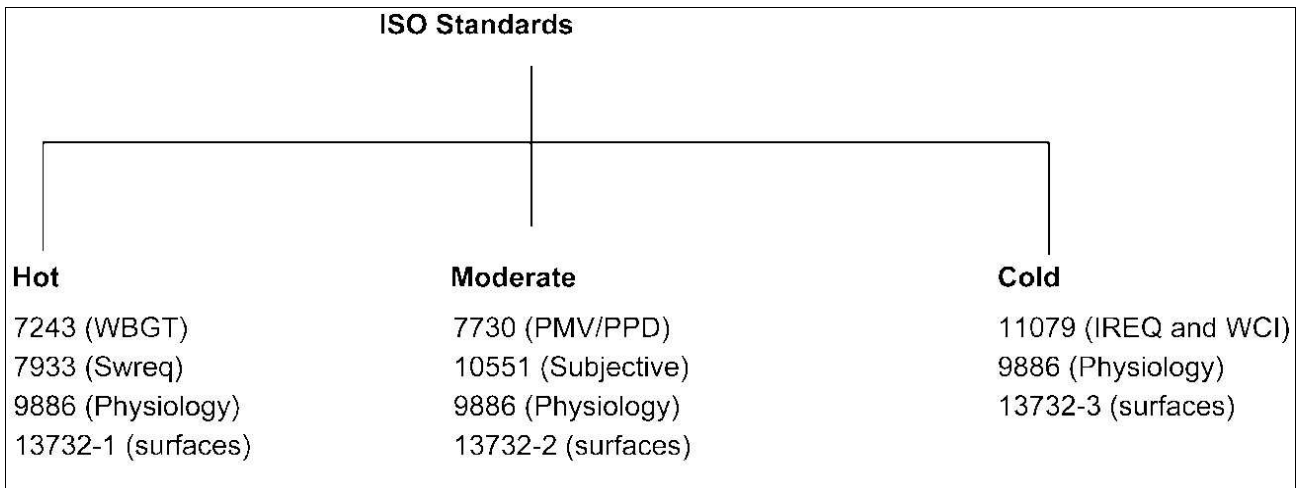
Método	Años en uso	WB	T_g	Pesos (WB, t_g, t)	Bibliografía
1	1954	t ^a del termómetro psicrométrico	Esfera exterior negra	0.7; 0.3; 0.0	Yaglou y Minard, 1957
2	No usado	NWB al sol		0.7; 0.3; 0.0	Minard, 1964
3	1956	NWB a la sombra	Esfera exterior negra	0.7; 0.2; 0.1	Minard et al., 1957
4	1956-1960	NWB al sol	Esfera exterior negra	0.7; 0.2; 0.1	Minard, 1961

WB: cualquier tipo de temperatura húmeda. NWB: temperatura natural

En un principio, el modelo número 4 se basaba en un aparato que tomaba los datos y con éstos se hacían a mano las operaciones simples matemáticas que correspondiesen. Así se evitaba el uso de tablas. Pero los cálculos estaban referidos a individuos vestidos. En 1960 Yaglou recalculó los valores con un globo estándar de 150 mm, además de afirmar que sólo era válido para el cálculo en caso de calor.

En 1971 la *American Conference of Governmental Industrial Hygienist* (ACGIH, 1996; Hunter y Minyard, 1999), estableció los límites para el uso de la WBGT como índice de estrés de calor. Este organismo en 1972 modificó los parámetros y en 1974 la Occupational Safety and Health (Emes, 1978) los adoptó. Actualmente está regulado por una serie de normas ISO, en función de si es para calor o frío, así como un intermedio, como se puede ver en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Tipos de ISO para las diferentes condiciones meteorológicas



En 1990 Rodríguez (Verdaguer et al., 1995b) construyó el primer aparato comercial que daba los datos directamente y utilizó en dos pruebas deportivas en Nueva York. Posteriormente Verdaguer et al. (1995b) hizo el primer estudio en un maratón de primer nivel, como fue la de los Juegos Olímpicos de Barcelona 1992.

En estos años ha ganado peso el estudio de sus efectos no sólo a las personas sino a otros seres vivos que participan en las olimpiadas, como los caballos (Marlín, 2009). También se ha empezado a escribir sobre el índice y su efecto sobre las islas térmicas urbanas (Ohashi, 2009) donde se está desarrollando un sistema de avisos a fin de evitar enfermedades en el cerebro. También existen estudios referidos las olas de calor (Papanastasiou, 2010), sobretodo en Japón. En España, además del trabajo precursor de Verdaguer et al (1995b) se han publicado también otros trabajos que utilizan este índice (Fernandez-Raga, 2010; Tobias, 2009) y algunos que investigan sobre riesgos laborales de trabajadores (Perez-Alonso, 2011)

Además, con este índice, la *American Collage of Sports Medicine* (ACSM, 1984; Verdaguer et al., 1995b) cataloga en el riesgo es bajo, moderado, alto o muy alto en el caso de las maratones, así como en otros deportes. Según esta organización y para las maratones, bajo es con un índice inferior a 18, moderado entre 18 y 23, alto entre 23 y 28, mientras que extremo es por encima de los 28.

1.2.- Cálculo del índice a partir de los datos de estaciones meteorológicas

Recordemos que WBGT se calcula usando la fórmula 1.1, que volvemos a reproducir.

$$\boxed{WBGT = 0,1 t + 0,2 t_g + 0,7 t_N} \quad (1.1)$$

La manera de obtener las diferentes variables desde estaciones meteorológicas normales es mediante los siguientes cálculos:

1.2.1 Cálculo de la t_g

Para el cálculo de la temperatura del globo negro, hay dos maneras, la empírica, deducida matemáticamente y posteriormente demostrada con medidas (Liljegren, 2008) y la que se ha buscado la correlación entre los datos meteorológicos, tal como ha hecho Turco et al. (2010).

La manera empírica se halla al resolver la siguiente ecuación (Liljegren, 2008):

$$t_g^4 = \frac{1}{2} \left[(1 + \varepsilon_a) t^4 - \frac{h}{\varepsilon_a \sigma} (t_g - t) + \frac{S}{2 \varepsilon_g \sigma} (1 - \alpha_g) \left[1 + \left(\frac{1}{2 \cos(\theta)} - 1 \right) f_{dir} + \alpha_{sfc} \right] \right] \quad (1.3)$$

siendo ε_a la emisividad de la atmósfera, que la podemos aproximar por la emisividad del vapor de agua, debido a que el gas que más absorbe y emite en infrarrojos es éste; ε_g la emisividad del bulbo negro; S la radiación, σ la constante de Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$); α_g el albedo del globo; θ ángulo de incidencia del Sol (dato que, si bien no se mide, fácilmente se puede calcular sabiendo el día y la hora de la recogida de los datos; como explicaremos más adelante) y f_{dir} la fracción de la luz que llega de forma directa (se puede aproximar tal como se verá posteriormente) h el coeficiente de convección del calor y α_{sfc} albedo del suelo.

Algunas de estos parámetros son conocidas como $\varepsilon_g = 0.95$ (valor que viene por la definición del material del aparato desde 1960 hecha por Yaglou (Parsons, 2006) y $\alpha_g = 0.05$ (Liljegren, 2008). El albedo del suelo evidentemente cambia de uno a otro lugar, por lo que hemos tomado una media del asfalto $\alpha_{sfc} = 0.15$ (Ochoa de la Torre, 1999)). Con estos datos si se reescribe la ecuación

anterior (1.3) queda :

$$t_g^4 = \frac{1}{2} \left[(1 + \varepsilon_a) t^4 - \frac{h}{\varepsilon_a \sigma} (t_g - t) + \frac{S}{(2 \cdot 0,95 \sigma)} (1 - 0,05) * \left[1 + \left(\frac{1}{2 \cos(\theta)} - 1 \right) f_{dir} + 0.15 \right] \right] \quad (1.4)$$

que operando queda en función de la humedad, la radiación directa y la temperatura como:

$$\boxed{t_g^4 = \frac{1}{2} \left[(1 + \varepsilon_a) t^4 - \frac{h}{\varepsilon_a \sigma} (t_g - t) + \frac{S}{(2 \sigma)} \left[1 + \left(\frac{1}{2 \cos(\theta)} - 1 \right) f_{dir} + 0.15 \right] \right]} \quad (1.5)$$

Otra manera de calcular la temperatura del globo negro, es como propone Turco et al. (2010) y es simplemente

$$t_g = (1.360t - 2.358)(0.0747 * \ln(S) + 0.5617) \quad (1.6)$$

siendo t la temperatura del aire y S la radiación total del sol. Esta manera tiene la ventaja que se pueden omitir los apartados 1.2.2 a 1.2.5 al disponerse de todos los datos, pero el inconveniente de que la temperatura del globo negro no es totalmente precisa, dado su origen experimental.

1.2.2.- Cálculo de la presión de vapor

A la ecuación 1.3 ahora se le añade el factor de humedad, sabiendo que en primera aproximación

$$\varepsilon_a = 0.575 e_a^{(1/7)} \quad (1.7)$$

siendo

$$e_a = HR \cdot \exp \left[\frac{17.62 t_d}{t_d + 243.5} \right] \quad (1.8)$$

dado que el mayor efecto de retención de la radiación infrarroja (y por tanto de emisión) es el vapor de agua, y quien retiene más de un 60% de promedio, aunque en las condiciones del estudio del índice es mayor, al ser situaciones de alta humedad y temperaturas altas, por tanto mucho vapor de agua. Evidentemente en los cálculos sólo interesa la radiación que llega al suelo, por lo que aquella que es emitida y reabsorbida por la propia atmósfera queda descartada.

El vapor de agua lo podemos calcular a partir de la temperatura de rocío y ésta sí que es deducible de los datos de las estaciones, que la obtenemos del siguiente modo:

Según la OMM, la temperatura del punto de rocío puede calcularse según:

$$t_d = \frac{243.12 \cdot \ln\left[\frac{e'}{6.112 \cdot f[p]}\right]}{17.62 - \ln\left[\frac{e'}{6.112 \cdot f[p]}\right]} \quad (1.9)$$

que operando puede reescribir como

$$t_d = \frac{243.12 \cdot \left[\ln\left[\frac{HR}{100}\right] + \frac{17.62t}{243.12 + t} \right]}{17.62 - \ln\left[\frac{HR}{100}\right] - \frac{17.62t}{243.12 + t}} \quad (1.10)$$

siendo HR la humedad relativa en tanto por ciento y t la temperatura del aire en grados centígrados con la que podemos calcular la presión de vapor (1.8) y con ésta la podemos sustituir en (1.7) y tendremos ε_a . Con ello sólo faltaría calcular la radiación directa y difusa así como el ángulo cenital.

1.2.3 Cálculo de la radiación directa f_{dir}

Anteriormente se comentaba que la radiación directa se puede aproximar en caso de no disponerse de datos, cosa bastante habitual dado que las estaciones por lo general no lo tienen; ya que es un dato que ni la red de estaciones sinópticas lo recoge directamente. A modo de ejemplo, en Catalunya, sólo se mide en las estaciones de Lleida y Roquetes de la AEMET y en la Facultat de Física de Barcelona (AEMET, 2009). Pero hay un dato que sí es cierto, no aproximado, en cualquier estación; y es que cuando está nublado o en ese momento no da el Sol directamente al medidor, toda la radiación es difusa. Pero cuando el heliógrafo registra radiación se puede hacer cualquiera de las aproximaciones siguientes:

1.- El dato sea siempre constante, e independiente de la hora de medición. En este caso Hunter y Minyard (1999) proponen que la fracción radiación directa sea de 0,67 de la total independiente de la hora y día del año.

2.- La radiación directa varíe con la hora, tal como propone Liljegren (2008) en que la fracción directa depende del ángulo cenital y de la distancia de la Tierra al Sol , siendo su fórmula:

$$f_{dir} = \exp\left[3 - 1.34 \cdot S' - \frac{1.65}{S'}\right] \theta(89,5^\circ - \alpha) \quad (1.11)$$

siendo $\theta(x)$ la función de Riemman y $S' = \frac{\text{radiación total}}{(1367 \cos(a) / (d_{Tierra-Sol})^2)}$ (1.12)

La distancia Tierra-Sol se expresa como $d = d_{Tierra-Sol} / d_{media \text{ Tierra Sol}}$ y α es el ángulo cenital.

Para el cálculo de la distancia Tierra-Sol, Spencer desarrolló la siguiente fórmula (Vera, 2005) con un error de un 1%

$$d = \frac{1}{\sqrt{(1.000110 + 0.034221 \cos(\gamma) + 0.001280 \sin(\gamma))}} \quad (1.13)$$

siendo

$$\gamma = 2\pi \frac{(dia - 1)}{365} \quad (1.14)$$

1.2.4 Cálculo de la altura del Sol

Para calcular la altura del Sol en estaciones fuera de las zonas tropicales (Stull, 1988; Zang, Anthens, 1982) sólo basta saber la latitud y el número de días que han transcurrido desde el inicio del año. Con todo esto, podemos calcular la declinación del ángulo solar

$$\delta_s = \phi_r \cos\left[\frac{2\pi(d - dr)}{dy}\right] \quad (1.15)$$

siendo ϕ_r la latitud del Trópico de Cáncer ($23^\circ 26'16'' = 0,409$ rad); d el día del año y d_r el día del solsticio de verano (173 en el hemisferio norte y 355 en el sur).

Con ello, podemos calcular la altura del Sol

$$\psi = \arcsin\left[\sin(\phi) \sin(\delta_s) - \cos(lat) \cos(\delta_s) \cos\left(\frac{\pi t_{solar}}{12} - \lambda\right)\right] \quad (1.16)$$

siendo ϕ y λ la latitud y longitud del observatorio.

Con todo ello podemos ya calcular la t_g , dado que sólo necesitamos aplicar a la fórmula (1.5) las ecuaciones (1.6), (1.10) y la que deseemos de la radiación directa; aunque para llegar a (1.16) se deben hacer todos los cálculos anteriormente detallados; mientras que para la emisividad calculada según la ecuación (1.6), con aplicar las fórmulas (1.8) y (1.10) ya se puede resolver. O sea, salvo los datos del porcentaje de radiación directa y el ángulo del sol, t_g , se resuelve siguiendo los siguientes pasos.

1.2.5 Pasos a seguir para calcular t_g

Se calcula la temperatura del rocío según la ecuación 1.9

$$t_d = \frac{243,12 \cdot \left[\ln(HR/100) + \frac{17,62t}{243,12+t} \right]}{17,62 - \ln(HR/100) - \frac{17,62t}{243,12+t}} \quad (1.9)$$

con ella se calcula la emisividad según la ecuación

$$\varepsilon_a = HR \cdot 6,112 \cdot \exp\left[\frac{17,62t_d}{243,12+t_d}\right] \quad (1.17)$$

y sabiendo la altura del Sol (ecuación 1.16) así como la fracción de la radiación directa, sustituimos todo en la (1.4).

$$t_g = \left[\frac{1}{2} \left[(1 + \varepsilon_a)t^4 - \frac{h}{\varepsilon_a \sigma} (t_g - t) + \frac{S}{(2\sigma)} \left[1 + \left(\frac{1}{2\cos(\theta)} - 1 \right) f_{dir} + 0,05 \right] \right] \right]^{1/4} \quad (1.4)$$

1.2.6 Cálculo de la t_N

Para realizar estos cálculos, se puede, como anteriormente, hacerlo exacto o aproximado.

Para el cálculo del índice de la temperatura natural se emplea, en el modo exacto, la

siguiente fórmula (Hunter y Minyard, 1999):

$$t_N = t' + 0.021S - 0.42u + 1.93 \quad (1.18)$$

siendo t' la temperatura del termómetro húmedo; u la velocidad del viento en m/s y S la radiación del Sol en W/m^2 . t' por definición ha de estar entre t_d y t . Puede ocurrir que, $t'=t_d$, cuando la es el 100%, pero en general hay que calcularla a partir de la humedad relativa en caso de las estaciones automáticas, dado que en las manuales la miden directamente.

Si no se tiene en cuenta el aporte externo en el equilibrio (por tanto se hace la suposición que $t' = t_{psicrometrica}$), cosa que no induce a un gran error, se puede resolver de varias formas: dos directas, tal como proponen Pilatowsky-Figueroa (2002) y otra indirecta, como proponen Rogers y Yau (1989)

De forma directa pero aproximada podemos usar la ecuación psicrométrica

$$e = e_s - 0,66 * 10^3 p (t - t') (1 + 1.146 * 10^3 t') \quad (1.19)$$

que operando y despejando queda finalmente en:

$$t' = \frac{189090 \cdot t - 115 + \sqrt{(189090 \cdot t - 115)^2 - 189090 \cdot \frac{(e_s - e)}{p}}}{378188} \quad (1.20)$$

siendo e la presión de vapor del aire; e_s la presión de vapor saturante a la temperatura del aire, t la temperatura en Celsius y P la presión.

Otra posibilidad es utilizar la ecuación propuesta por Liljegren (2008)

$$t' = t - \frac{\Delta H}{C_p} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{aire}} \cdot \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^a \cdot \left(\frac{e_w - e_a}{P - e_w} \right) \quad (1.21)$$

siendo $a=0,56$; M_{H_2O} masa molecular del agua (18 kg/kmol); M_{aire} la masa molecular media del aire seco (28.97 kg/kmol); $e_a = HR \cdot e_{sat}(t)$, Pr el número de Prandtl y Sc el número de Sherwood, que operando resulta ser, aplicando entre otros las definiciones dadas por Bedingfield y Drew (Bedingfield y Drew, 1950; Liljegren, 2008).

$$T' = T - \frac{\Delta H}{C_p} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{aire}} \cdot \left(\frac{C_p \cdot \rho \cdot 1.13 \cdot 10^{-9} \cdot T^{1.724} \cdot \left(\frac{P_o}{P} \right)}{\kappa} \right)^{0.56} \cdot \left(\frac{e_w - e_a}{P - e_w} \right) \quad (1.22)$$

siendo ρ la densidad del aire ($\rho = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$); κ la conductividad térmica ($\kappa = 26 \text{ W/K}$), T' y T están expresadas en grados Kelvin, e_w la expresada en la ecuación 1.20 y e_a tal como se ha calculado en la ecuación 1.7.

Un tercer camino para el cálculo de la temperatura del termómetro húmedo t' requiere resolver la siguiente ecuación de forma iterativa

$$T' = T - \frac{L}{c_p} \left[\frac{e}{p} A \cdot \exp(T'/B) - w \right] \quad (1.23)$$

siendo $A = 2.53 \cdot 10^8 \text{ kPa}$, $B = 5,42 \cdot 10^3 \text{ K}$, $L = 2440 \text{ J/g}$ aunque varía un 1% en el intervalo de 15°C a 35°C y w es la proporción de mezcla.

Debido a las dificultades en hacer los cálculos, en muchos observatorios todavía se usan unas tablas que se encuentran en el anexo 1.

Si se substituye t' en (1.18) ya se tiene la t_N , que con la t_g calculada en (1.4) se puede calcular el valor de WBGT substituyéndolo en la ecuación (1.1).

Otra manera de calcular t_N es suponer que $t_N = \text{THI}$ según la aproximación que hacen Haugton y Driscoll (Hunter, Minyard, 1999; Haugton, Driscoll, 1985). Ésta es fácil de calcular ya que sólo hemos de calcular t' y es válida en condiciones en que se desconocen la radiación solar y el viento. Pero es importante tener en cuenta que sólo es válida en caso de humedades relativamente altas y poco viento

$$\text{THI} = 0,4 \cdot (t + t') + 4,8 \quad (1.24)$$

2.- Descripción del circuito

2.1 Climatología

El maratón discurrió por las calles de Barcelona. Es una ciudad que se encuentra al nordeste de la Península Ibérica y a orillas del Mediterráneo. La trama urbana abarca muchas alturas desde los 0 a 250 metros, aunque en el municipio se alcanzan hasta los 516 m (Tibidabo). Por ello, la climatología de la zona, sin incluir el efecto de la isla de calor urbana (Fisher et al., 2005), es muy compleja; dado que los dos ríos que la circundan (Llobregat y Besós) suponen las únicas entradas y salidas de aire en el llano interior que se extiende entre la Cordillera Litoral y la Prelitoral (esta última con alturas de hasta 1712 m). Ello produce que la brisa entre con fuerza durante una buena parte del año y especialmente durante el verano.

Barcelona cuenta con el mar al sureste y muchas de sus calles fueron diseñadas paralelas a la costa o bien perpendiculares a ella, justamente para que entrase la brisa y se ventilase especialmente por donde discurrió el maratón. Durante el mes de julio la temperatura media diaria en Barcelona varía entre los 18°C y los 28°C (AEMET 2011), habiéndose alcanzado una temperatura máxima de 36,9 en el año 1986 (Arús, 2001). Este mes se caracteriza por tener una media de 11 días totalmente despejados, 310h de Sol y una humedad relativa media del 70%.

2.2.- Recorrido

El recorrido de la prueba del Maratón, en los Campeonatos europeos de atletismo consistió en dos vueltas a un circuito de 1097 metros y cuatro a uno de 10 km, completando así a los 42.195 km reglamentarios (Figura 2.1). Los organizadores proyectaron un circuito que pasase por algunos lugares emblemáticos de la ciudad siendo a la vez prácticamente llano. De hecho se consiguió que la pendiente máxima que tenían no llegara al 1%, y era de bajada (a la altura de la calle Marina). Por ello se descartó cualquier ascenso a montañas, como sí los hubo en el maratón de las Olimpiadas que acabó en el estadio de Montjuïc, a unos 100 m sobre el nivel del mar.

El primer circuito discurrió entre las calles passeig Picasso y avinguda del Marquès d'Argentera (por delante de la Estació de França), con un total de 1097 m. El segundo transcurrió por el passeig Picasso, passeig Pujades donde se instalaron unas duchas a lo largo de 10 m para que los atletas pudiesen refrescarse mientras corrían, passeig Lluís Companys, ronda de Sant Pere, Gran Via, passeig de Gràcia hasta la calle Aragó y vuelta al passeig de Gràcia. El cruce con la calle Aragó es la parte más alta del circuito (27 m). Desde Passeig de Gràcia continuaba por Gran Via, calle Marina, passeig de Circumval·lació, Marquès de l'Argentera y Pablo Picasso, donde se había iniciado. La figura 2.1 muestra el mapa oficial del maratón, donde se aprecian los dos circuitos, en azul el corto y en rojo el largo.

Figura 2.1 Mapa de la organización, donde se ven los recorridos cortos y largos superpuestos



La figura 2.2 muestra la superposición del recorrido del Maratón una ortofoto, del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), (ICC, 2010).

Figura 2.2 Mapa del recorrido del ICC (ICC 2010) sobre ortofoto. El norte queda arriba del mapa



3. Medida del Índice

3.1 Descripción de los instrumentos de medida

Para la realización de este trabajo se ha utilizado dos instrumentos que midiesen directamente el índice térmico WBGT además de la temperatura, humedad y temperatura del globo negro. El instrumento es el modelo HT30 de la casa Extech (Extech, 2006) (las instrucciones figuran en el anexo 3.1) (figura 3.1). También dispusimos de un ordenador portátil que nos almacenaba los datos con los programas facilitados por el fabricante (anexo 3.2), un trípode para situar el instrumento a 1.5 m de altura así como un adaptador de la señal de salida (en nuestro caso, de la casa Belkin modelo F5U103M), dado que este modelo lo tiene en forma de puerto de serie para los ordenadores, y nosotros lo necesitábamos en forma de USB.

Figura 3.1 Instrumento de medida



Al mismo tiempo, para garantizar que el ordenador pudiese trabajar todo el tiempo, tuvimos que conectar el equipo a la corriente durante las pruebas. El instrumento con los sensores medía la temperatura del globo negro, del ambiente y la humedad; además de facilitar los datos de índice. Los rangos con los que trabaja son, para la temperatura de 0 a 50°C con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$, la temperatura del globo negro, de -30°C a 55°C con un error de $\pm 3^\circ\text{C}$ en el exterior, una humedad

de 0 a 100% y con un error de $\pm 3\%$, si se estaba entre 10 y el 95 % aunque el aparato facilita una resolución decimal tanto en la humedad como en las temperaturas.

El propio fabricante facilita el software necesario para visualizar los datos y almacenarlos en formato texto, con el intervalo de tiempo deseado. A su vez el programa está preparado para emitir alarmas cuando se alcancen valores umbrales previamente fijados en las variables medidas. Esto último no se usó, dado que no se controló a ningún atleta, sino que se limitó a almacenar los datos.

El instrumento es portátil, como se ha dicho y dispone de baterías para su funcionamiento. Se editó un manual (anexo 3.3) para que cada equipo de manera autónoma pudiese resolver las dudas más frecuentes que le pudiesen surgir, antes de tener que consultar al responsable del proyecto. Dado que se había proyectado medir el índice térmico en dos lugares distintos del recorrido de la prueba del maratón, los dos ordenadores que iban a utilizarse se sincronizaron previamente con la hora oficial, con un error inferior a 1 segundo.

Además, antes de ser utilizados el día de la carrera, los instrumentos se comprobaron instalándolos durante unas horas junto a los instrumentos de las instalaciones de la estación automática que el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) tiene instalada en el Servei d'Esports de la Universidad de Barcelona .

El instrumental en su conjunto quedó instalado tal como se ve en esta fotografía (figura 3.2), en este caso tomada por el equipo de la UB.

Figura 3.2 Instrumento de medida del índice WBGT montado en la plaza Universidad



3.2 Situación de los puntos de medida

Para la toma de medidas se consideraron dos puntos del circuito a fin de lograr que los datos fueran representativos de las dos orientaciones distintas de las calles respecto al viento dominante. Además uno de los puntos de medida se ubicó muy próximo al parc de la Ciutadella donde el SMC dispone de una estación automática. En concreto el equipo se instaló en el edificio de la Universitat Pompeu Fabra (UPF) (figuras 3.3 y 3.4), ya que además se estaba muy cerca de la calle Marina por donde los corredores correrían en principio cara de cara al viento a lo largo de más de un kilómetro. Las coordenadas del lugar elegido como punto de observación son las siguientes: Longitud: 2° 11' 26.47" Latitud: 41° 23' 20.87" altura sobre el nivel del mar 5 m (ICC, 2010).

Figura 3.3 Ubicación del punto de medida en el edificio de la Universitat Pompeu Fabra

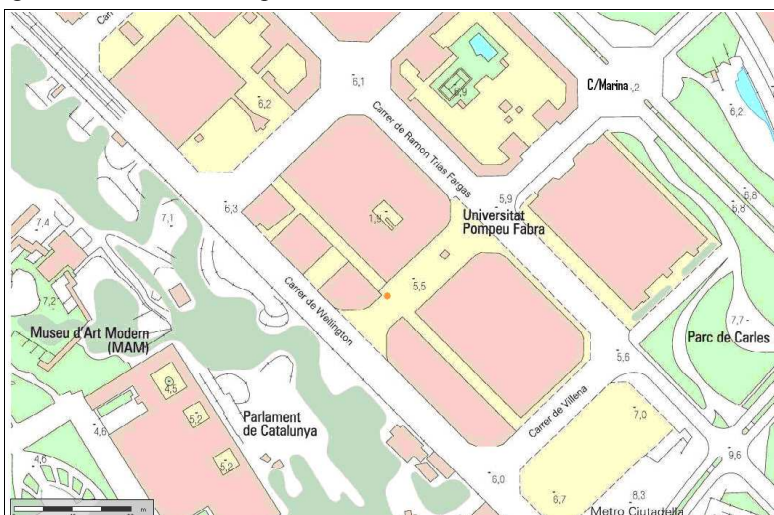
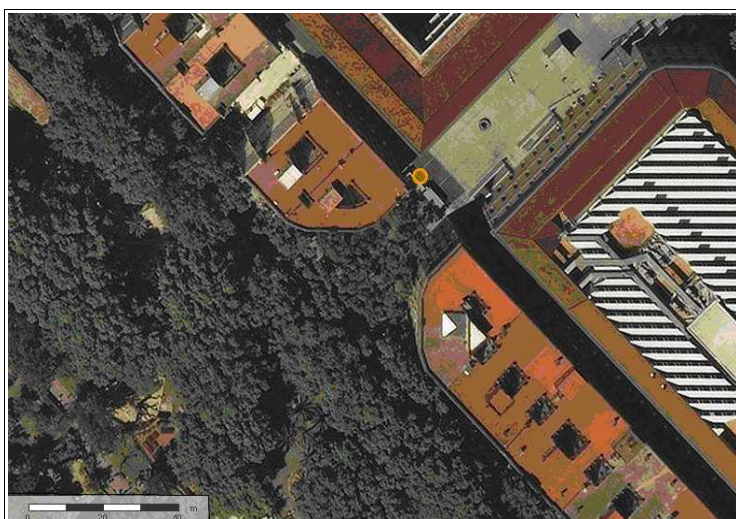
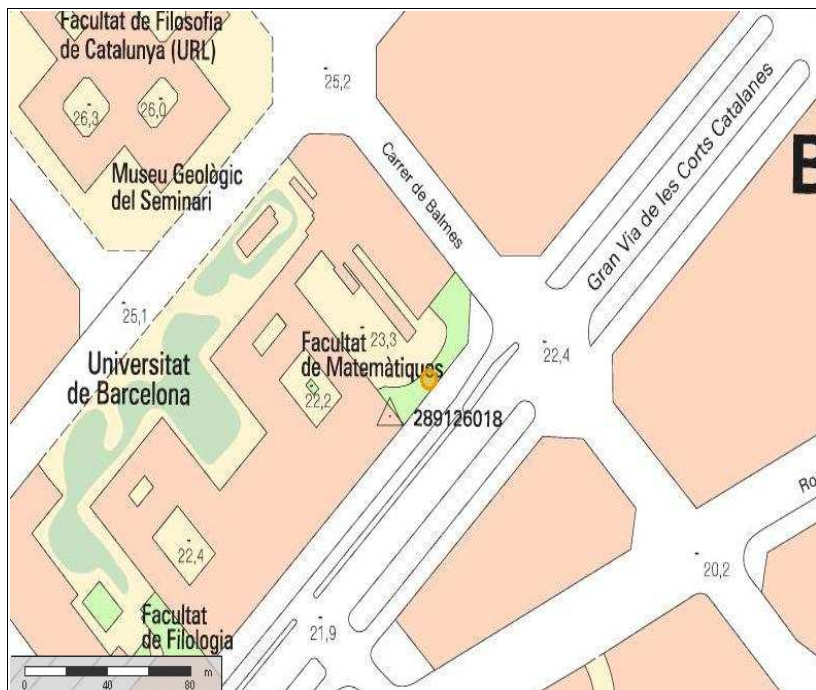


Figura 3.4 Foto aérea del mismo lugar



El otro lugar escogido para la toma de datos fue el jardín del edificio de la Universidad de Barcelona en la plaza Universidad del Campus de la Gran Vía de la Universidad de Barcelona (UB), (figuras 3.5 y 3.6), cuyas coordenadas son: Longitud: 2° 9' 52.96" Latitud: 41° 23' 13.58" con una altura 23 m (ICC, 2010). Este lugar se escogió ya que era representativo de las condiciones que iban a encontrar los atletas en su recorrido por las calles orientadas paralelas al mar.

Figura 3.5: Ubicación del punto de medida en el edificio de la Universidad de Barcelona en la plaza Universidad



En naranja el lugar de nuestra ubicación.

Figura 3.6 Foto aérea del mismo lugar



En naranja el lugar de nuestra ubicación. La regla inferior es de 40m

En los puntos de observación se procuró que las medidas no se viesen afectadas por la circulación de vehículos ni el riego de las zonas verdes próximas a los equipos.

En la elección de los puntos de observación se buscó además que los lugares estuviesen lo más alejados posibles, para poder observar las máximas diferencias, cosa que logramos en gran parte. En la figura 3.6 se observa la situación de los puntos de observación.

Figura 3.6: Localización de los puntos de observación



En naranja los lugares de ubicación.

3.3 Resultados

Una vez recogidos los datos, en primer lugar se llevó a cabo un control visual de los mismos, dado que el propio programa los grababa y mostraba la gráfica resultante, además de los valores que registrados. Este control se realizó para los datos correspondientes a los dos lugares de registro, a fin de comprobar que fuesen correctos. En caso de que se observase alguno erróneo, se anotaba la hora y minuto para que, una vez repasada toda la serie, éste fuese eliminado.

Posteriormente, como el programa de registro de datos lo permite, se revisó la representación completa de los datos de cada una de las series, a fin de detectar algún otro posible error en la serie.

Cabe hacer constar que, debido a la presencia de nubes bajas y de os árboles existentes en los puntos de observación en diferentes momentos durante el transcurso de la prueba los sensores de medida, en algunos momentos, estaban a la sombra. Pero esa también era la situación de los atletas que participaban en las carreras

Una vez validadas las series se elaboró un programa informático en Fortran (*unificación.f* anexo 3.4) en que calculaba las medidas minutas de todas las variables medidas que se han comentado como valores significativos de todos ellos.

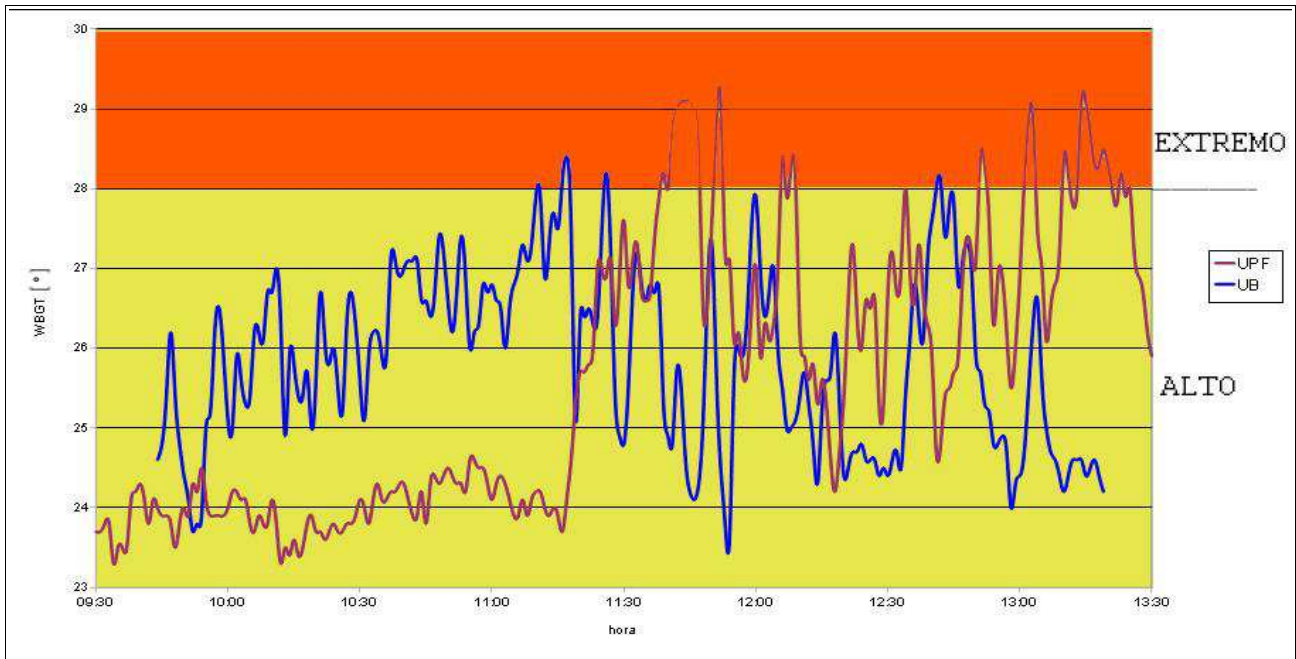
En el estudio se ha analizado los valores registrados durante las pruebas y se han comparado los obtenidos en los dos puntos de medida.

Como ya se ha dicho, los datos que registraban los sensores eran el valor del índice térmico WBGT, la temperatura, la humedad relativa del aire y la temperatura del globo negro.

3.3.1 Maratón femenino

La evaluación del índice térmico WBGT durante la prueba del maratón femenino que se celebró el 31 de julio del 2010 se presenta en la figura 3.7. La carrera se inició a las 10h de la mañana y la última corredora, cruzó la línea de meta a las 13h.

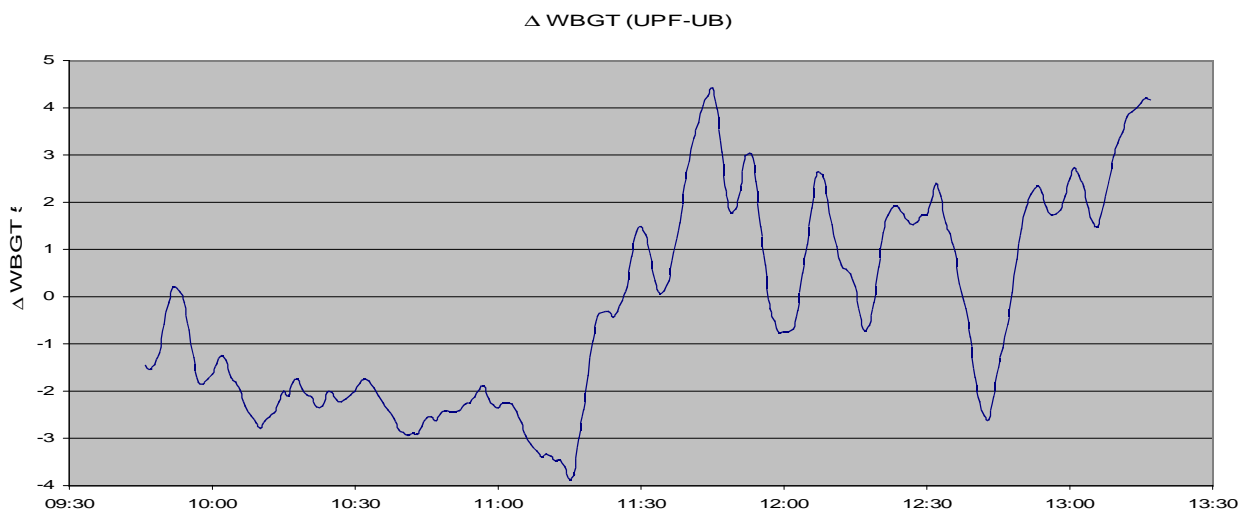
Figura 3.7 Evolución del índice térmico WBGT 31 de julio



Las diferencias entre los valores del índice en los dos puntos de observación registrados entre las 10:00 y las 11:19 se debe al hecho de la presencia de algunas nubes en esos momentos provocaron una disminución de la radiación incidente en el punto de medida de la UPF. Esta misma causa, la presencia de nubosidad variable, es la que explica también las diferencias registradas en el índice de medida en los dos puntos de la medida a lo largo de toda la prueba.

En la figura 3.8 se presentan las diferencias del índice térmico WBGT registradas durante la mañana del 31 de julio que han llegado a alcanzar los 4°

Figura 3.8 Diferencias del índice térmico WBGT (UPF-UB) (promedio de 5 minutos)

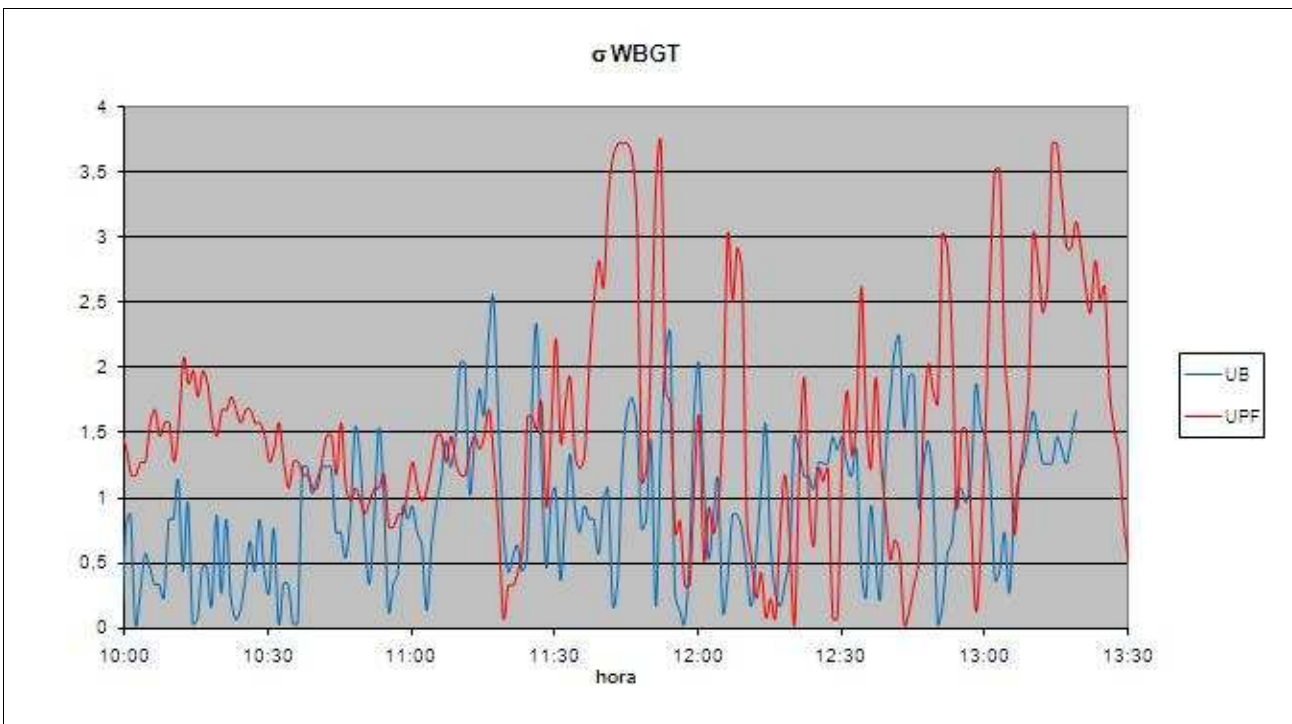


Las mayores diferencias (superiores a 2°) se registraron entre las 10:00 y las 11:20 y entre las 11:29 y las 11:58 y fueron debidas, fundamentalmente a las diferencias de radiación solar directa incidente en ambos puntos de observación.

Otro de los puntos que resalta es el de las 12 h 38' a las 12 h 48' que corresponde al paso de una nube. También destaca el punto de las 12 h 48' en que varía mucho, no sólo porque se nubla en la UPF (a la que ya le afecta poco al estar el suelo muy caliente) sino porque disminuye la temperatura, especialmente en la UB. También aumenta la humedad, tanto relativa como absoluta (medida como temperatura de rocío).

Si analizamos la desviación respecto a la media en valor absoluto (Figura 3.9), observamos que el índice oscila a lo largo de toda la jornada y en ambas estaciones. Sin embargo, el día 1 de agosto el valor del índice en la UPF se acercaba a la media constantemente; o sea, se estabilizaba. Esto se debió a que acabó imponiéndose un día soleado, cosa que no ocurrió el 31 de julio [anexos 3.7 y 3.8]. La media del índice fue en la UPF de 25.4° y en la UB de 25.9°, lo cual indica que de un lugar al otro fue oscilando.

Figura 3.9 Variación del índice respecto a la media en cada estación el 31 de julio

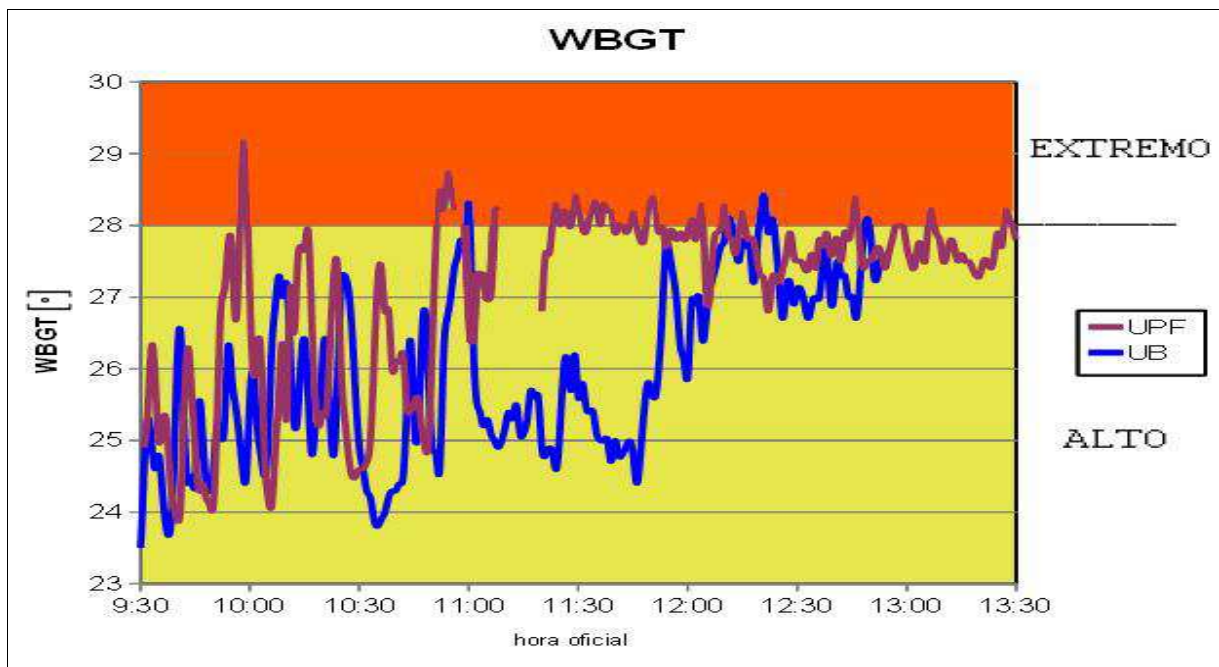


Respecto al resto de variables, en la UPF la temperatura media fue de 27.5°C y en la UB de 26.6°C .La media del globo negro fue en la UPF de 37°C y la humedad relativa fue del 62 % en la UPF y de 49 % en la UB.

3.3.2 Maratón masculina

El maratón masculina se celebró el domingo 1 de agosto de 2010, iniciándose a las 10 de la mañana. En la figura 3.10 se ha representado el valor minutal del índice térmico WBGT representado en los dos puntos de medida (UB y UPF)

Figura 3.10 Índice térmico WBGT durante la maratón masculina



Se observa que entre las 11:20 y las 12:00 hay una diferencia de 2 a 3° entre un lugar y otro, llegando incluso registrarse una diferencia próxima a 2.5° en el valor medio horario entre ambos lugares entre las 11:00 y las 12:00 (Figura 3.11).

La razón fundamental de estas diferencias radica en el efecto de la radiación solar, mientras que en la zona donde estaba situado el sensor de la UPF la radiación solar media de manera directa, el punto situado en la UB quedaba amortiguada por la presencia de arbolado en la zona. La figura 3.12 muestra los valores de la temperatura del globo negro registrados e los que se aprecia la marcada diferencia obtenida entre las 11:00 y las 12:00, coincidiendo con la segunda hora de celebración de la carrera.

Figura 3.11 Temperatura del globo negro en ambos puntos de estaciones del 1 de agosto

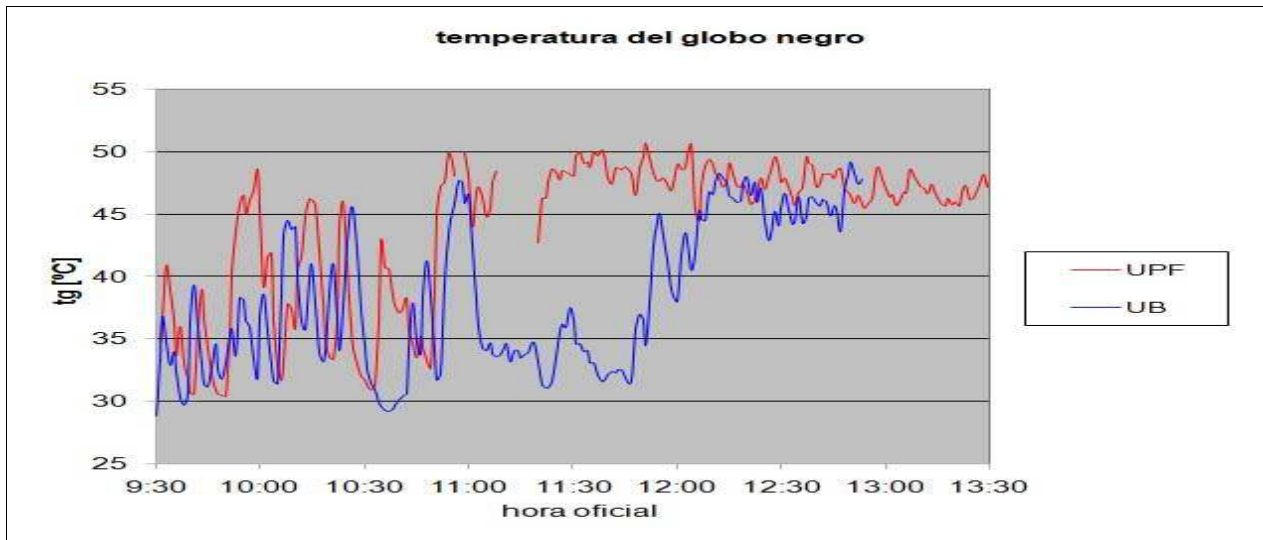
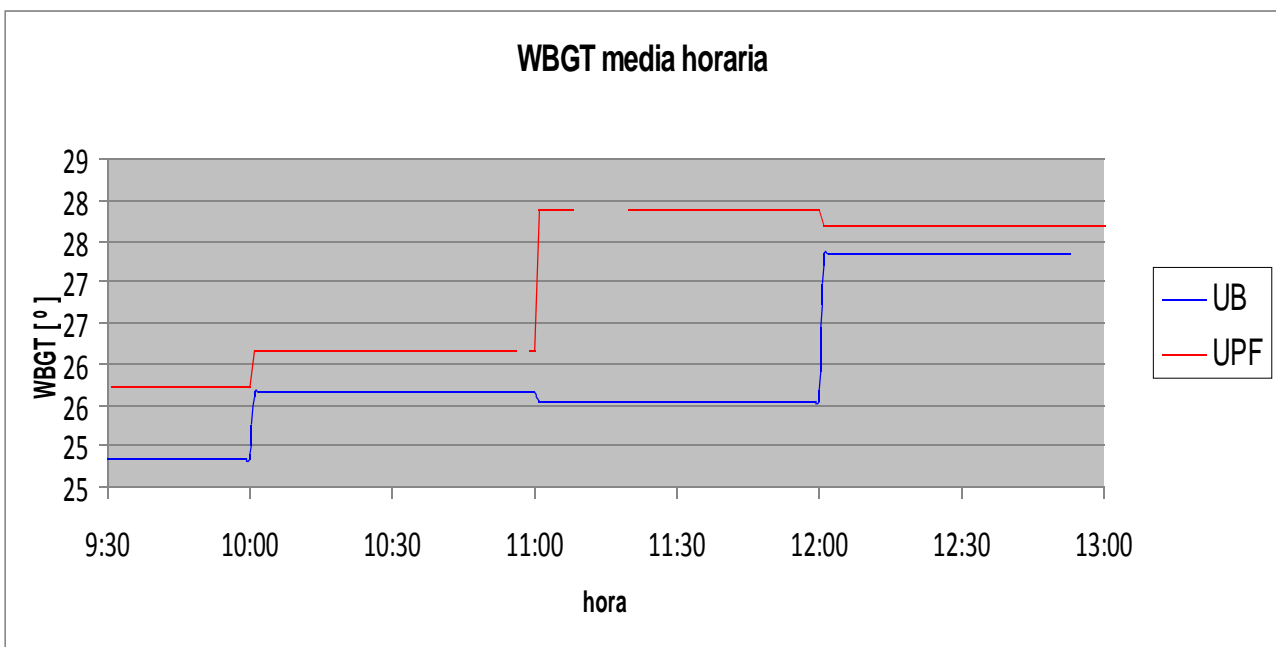


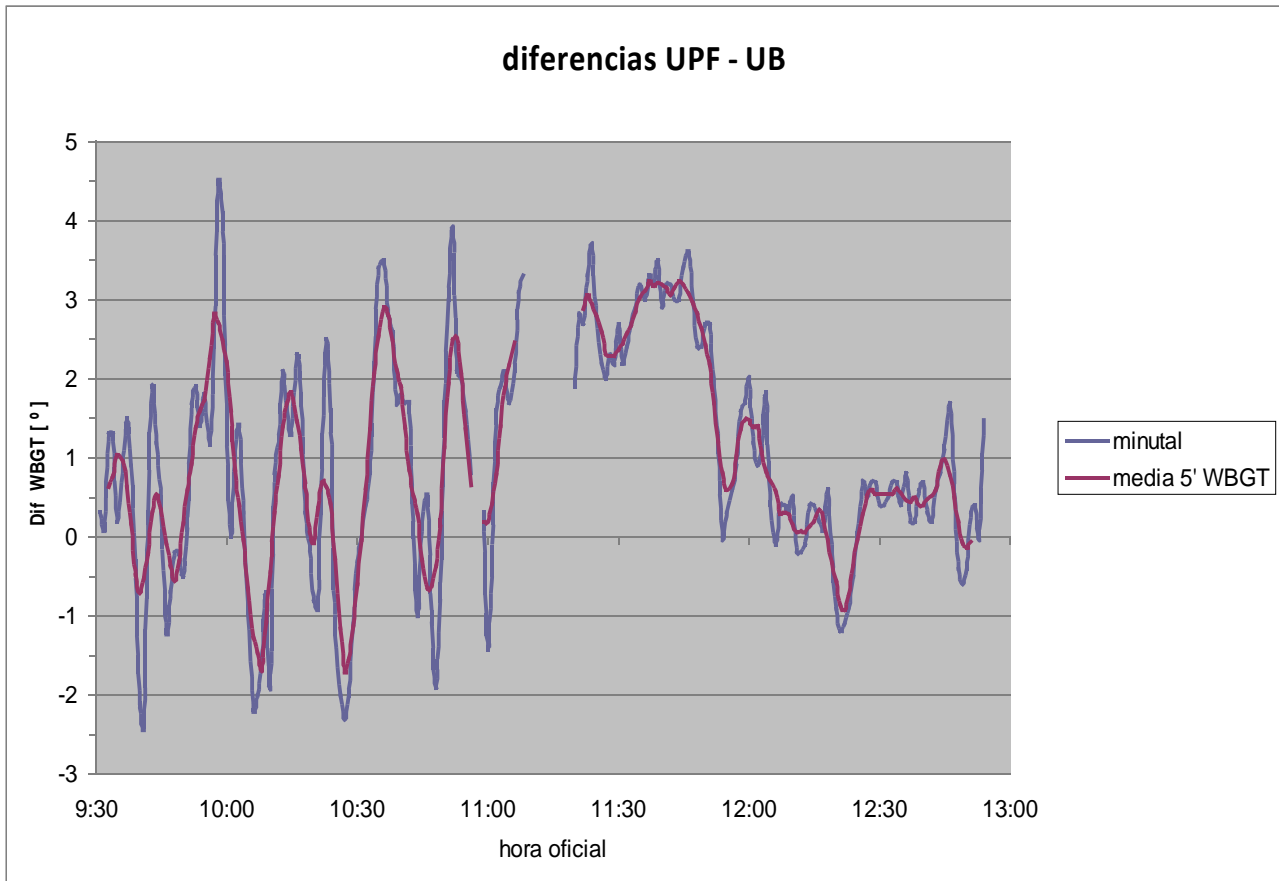
Figura 3.12 Media horaria del índice WBGT



Esta diferencia se observa mejor en el gráfico que representa las diferencias del índice térmico WBGT en los puntos de medida (UB y UPF) (Figura 3.10). Es debida a que no es un sensor ideal y, al darle el sol, la temperatura ambiente asciende un poco más de lo esperado.

Hay que indicar que los corredores cuando corrían por la Gran Vía iban entre sol y sombra; dado que, por la orientación de la calle y la hora, el Sol les daba perpendicularmente y gozaban de la sombra de los árboles, por lo que el índice medido en la zona del aparcamiento de la UB era representativo de las condiciones que afectaban a los atletas.

Figura 3.13 Diferencias WBGT



Otro de los aspectos destables es el pico en las diferencias registradas a las 9:58 (figura 3.13) que a las 9h 58' hay un pico. Esto se debe al aumento que experimentó en la UPF la temperatura del globo negro, del aire, y de la humedad relativa (Figuras 3.11, 3.14 y 3.16)

Figura 3.14 Registro de la temperatura en los dos puntos de observación

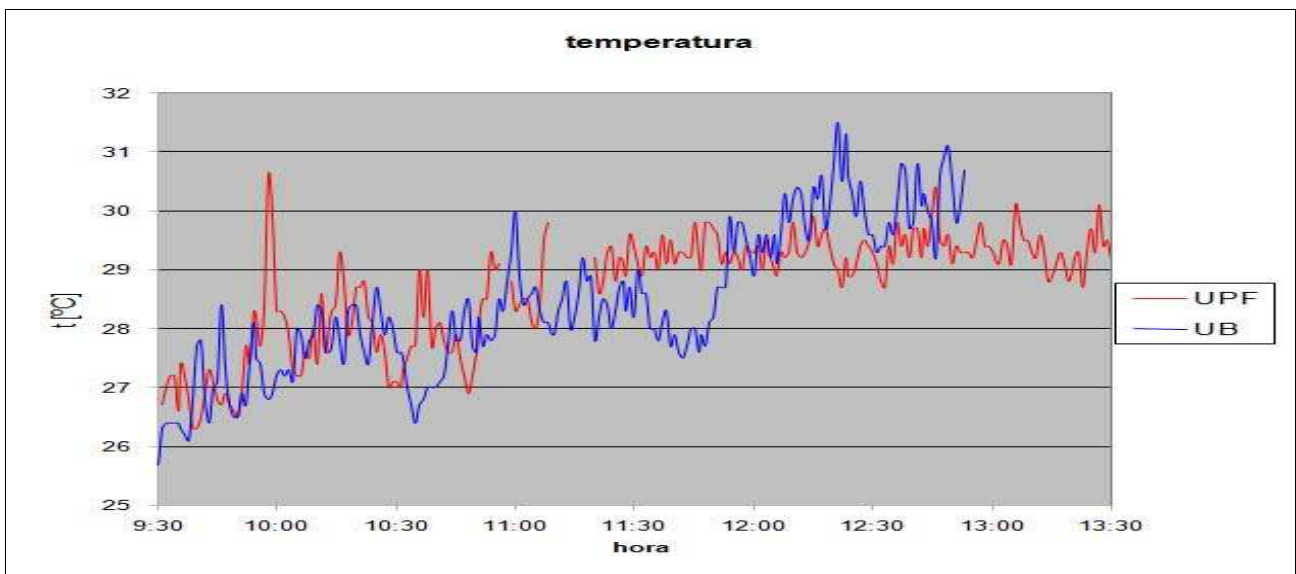


Figura 3.15 Temperatura del punto de rocío durante el maratón masculino

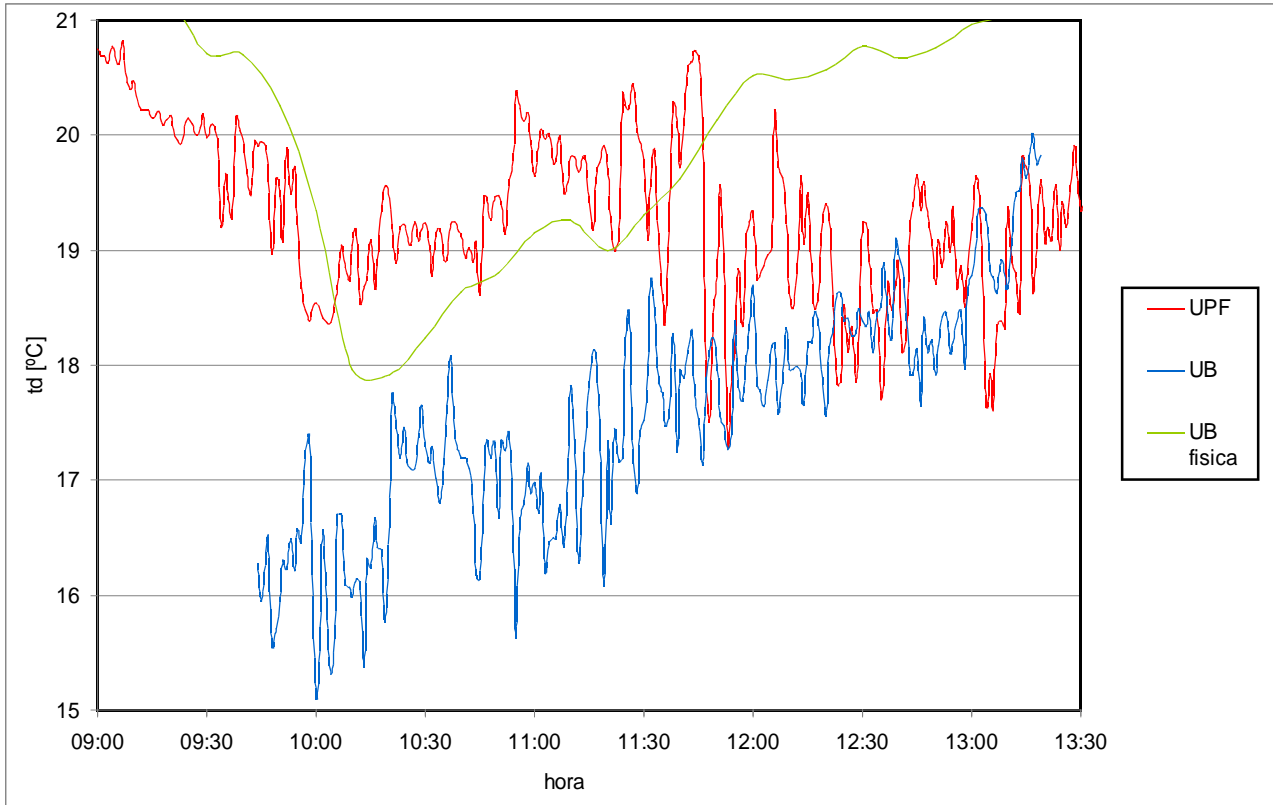
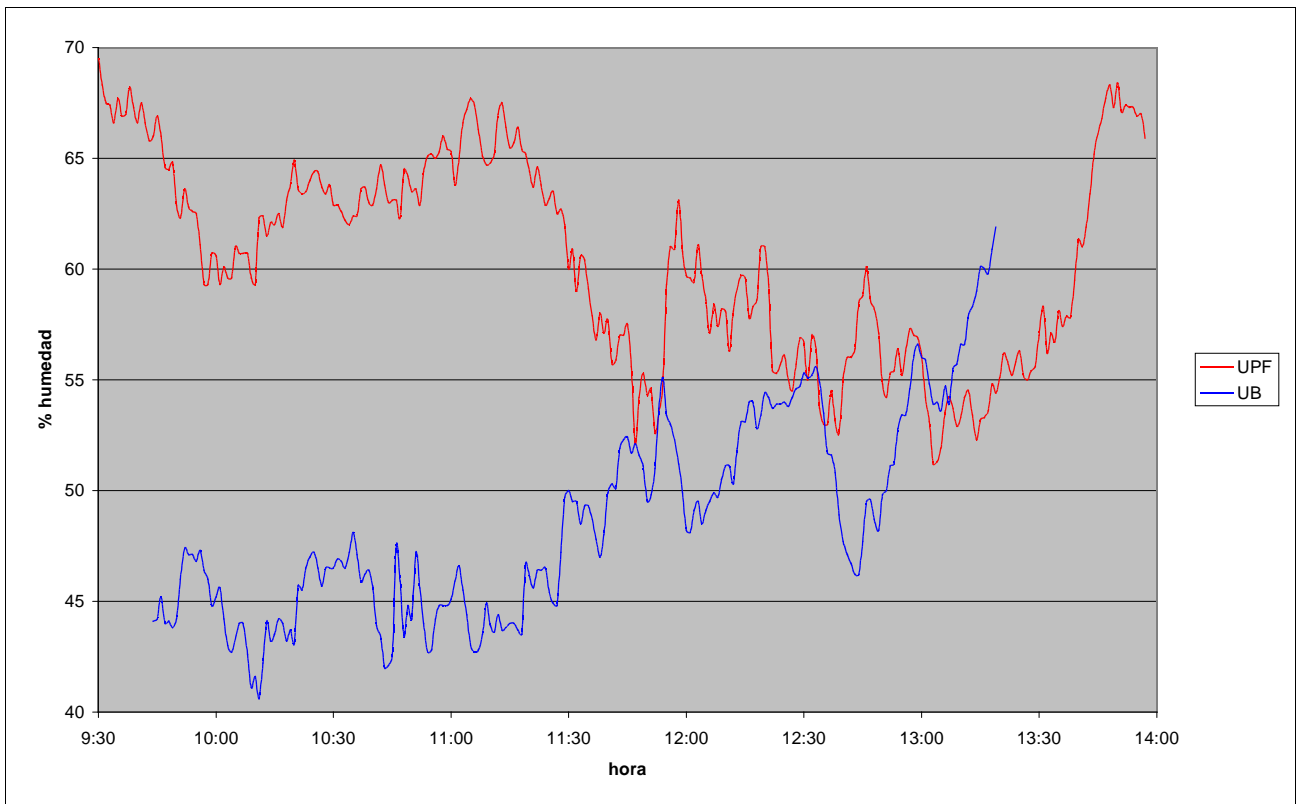


Figura 3.16 Humedad relativa durante la prueba del maratón masculino

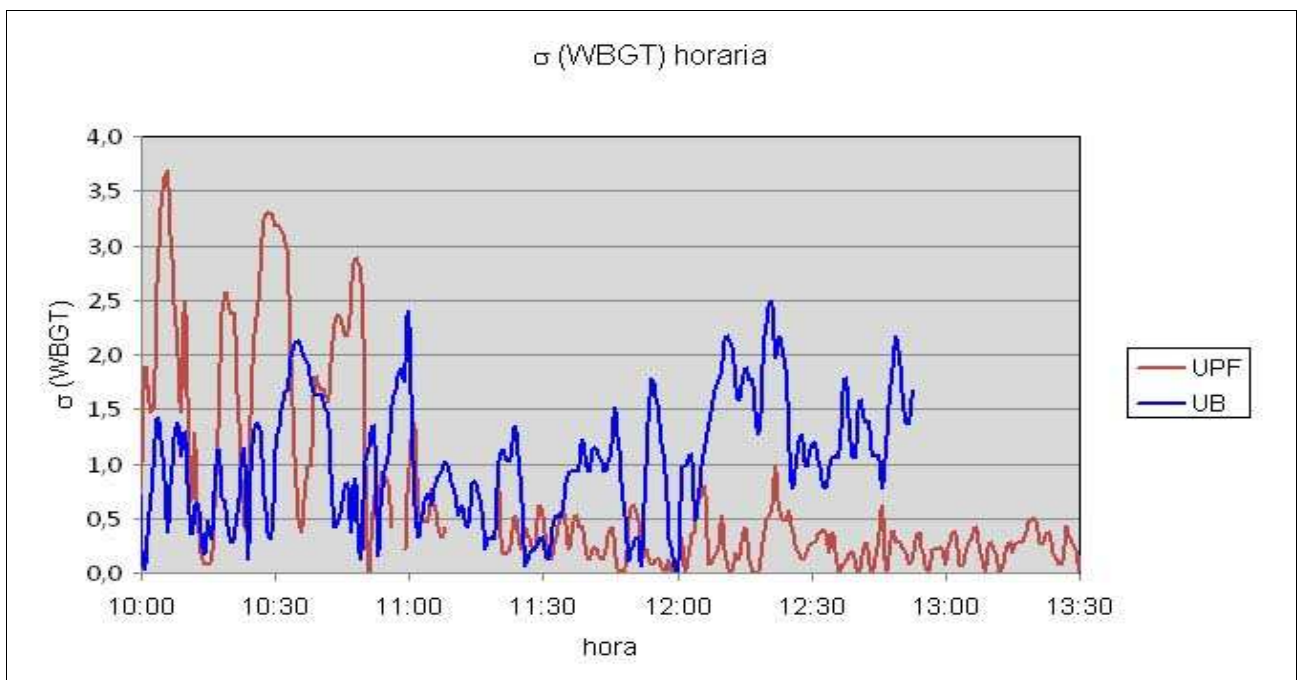


Otro instante interesante por las diferencias registradas tuvo lugar a las 10:35 en el que se observa un máximo del índice térmico WBGT en el punto situado en la UPF. A este máximo contribuye casi exclusivamente un aumento de la radiación solar.

Por último destacamos lo ocurrido a las 10:52, donde se observa otro máximo relativo en la diferencia en el índice debida a un aumento en la UPF respecto a la UB en todas las variables en conjunto. Muy probablemente el paso de algunas nubes en la zona de UB y que en cambio en la UPF estuvo expuesto al sol en ese intervalo de tiempo, podría ser la razón que explica las grandes variaciones en la temperatura del globo negro.

Si analizamos la desviación del índice térmico WBGT de la media horaria (Figura 3.14) vemos que en la UPF, se registraron las mayores diferencias durante la primera hora de la carrera mientras que a partir de las 11:00 fueron mayores en la zona de la UB.

Figura 3.17 Desviación del índice respecto a la media horaria



3.3.3 Superación de los valores umbrales del índice térmico WBGT

Uno de los objetivos de este trabajo era valorar la dureza de las condiciones meteorológicas a las que se enfrentaron los atletas con ayuda del índice térmico WBGT. Como se ha dicho

anteriormente hay ciertos límites para cada actividad, por lo que con los datos registrados podemos contabilizar el número de veces que se superó umbral durante la celebración de las pruebas.

Saladié (2008) establece los umbrales de 25°, 26°, 28° y 30°; que corresponden respectivamente a los intervalos de consumo metabólico: 260, entre 200 y 260, entre 130 y 200 y entre 65 y 130 W/m². Según las observaciones se detecta que en muchos momentos los corredores deberían haber parado totalmente o, al menos, haber continuado la carrera andando.

Como se muestra en la tabla 3.1, cuando los corredores pasaban por la Gran Vía, cerca del punto de medida situado en la UB, durante la primera hora de la carrera los valores minutales de índice térmico WBGT superaron los 25° en un 65% del tiempo, valor que ya se considera alto y recomienda una reducción drástica del esfuerzo físico.

Tabla 3.1 Porcentaje de los minutos en que se superaban los niveles de WBGT indicados el 1 de agosto
En la UB

hora	WBGT > 25°	WBGT > 26°	WBGT > 28° (extremo)
9-10 h	43.8	6.3	0.0
10-11 h	65.0	41.7	1.7
11-12 h	66.7	16.7	0.0
12-13 h	100	100	9.4

En la UPF

hora	WBGT > 25°	WBGT > 26°	WBGT > 28° (extremo)
9 -10 h	60.0	36.7	6.7
10 -11 h	77.6	51.7	8.6
11 -12 h	100	100	36.7
12 -13 h	100	100	11.7
13 -14 h	100	100	13.3

En la UB y UPF al mismo tiempo

hora	WBGT > 25°	WBGT > 26°	WBGT > 28° (extremo)
9-10 h	37.5	3,1	0
10-11 h	51,7	19.0	0
11-12 h	69.5	37.3	0
12-13 h	100	100	0

Los registros demuestran que siempre fue peor correr por el tramo de la UPF que por el de la UB debido al efecto comentado de la radiación.

El 31 de julio, en cambio si que cambiaron los lugares con más minutos por encima de los umbrales, a lo largo de toda la jornada y cota del índice, dado que si bien la cota extrema siempre estuvo mejor en la UB, las cotas de 25° y 26°, hasta las 12h se estuvo mejor por la UPF, tal como se puede apreciar en la tabla 3.2. Pero igual que en la del día 1 de agosto, al mirar los dos puntos a la vez, en ninguna se superó ningún minuto el nivel extremo.

La dureza de la carrera queda claramente de manifiesto por los valores extremadamente altos del índice térmico y por los resultados de la prueba que resultó ser el maratón más lento de unos campeonatos europeos desde el año 1969.

Tabla 3.2 Porcentaje de tiempo en que se superaron los valores umbrales del índice térmico el 31 de julio

En la UB

hora	WBGT > 25°	WBGT > 26°	WBGT > 28° (extremo)
9-10 h	43.7	18.7	0
10-11 h	95.0	60.0	0
11-12 h	81.7	61.7	5.0
12-13 h	60.0	35.0	1.7
13-14 h	21.1	10.5	0

En la UPF

hora	WBGT > 25°	WBGT > 26°	WBGT > 28° (extremo)
9-10 h	0	0	0
10-11 h	0	0	0
11-12 h	68.3	56.7	16.7
12-13 h	91.7	61.7	8.3

Y en ambas a la vez.

hora	WBGT > 25°	WBGT > 26°	WBGT > 28° (extremo)
9-10 h	0	0	0
10-11 h	0	0	0
11-12 h	51.7	25.0	0
12-13 h	50.0	18.3	0

3.3.4 Comparativa con el estudio de Verdaguer-Codina et al. (1995a)

Si se compara los resultados de este estudio con el que hizo Verdaguer-Codina et al. (1995a), se encuentra una gran diferencia entre los valores de las variables medidas en ambas maratones masculinas (temperatura del aire, temperatura del globo negro e índice térmico WBGT). Así, la temperatura del globo negro no superó los 38°C en el citado estudio, mientras que en el presente trabajo se ha obtenido una media de 47.6°C, con un máximo de 50.7°C. Las diferencias en los valores del índice térmico WBGT también fueron notables, mientras en su caso varió entre 18.9° y 23.9° en el nuestro el índice ha variado entre 23.9° y 29.1°. En el caso de la maratón femenina, en ambas se constató que hubo niveles extremos del índice, aunque en los Juegos Olímpicos fue al principio, mientras que en el presente estudio fue al final. La razón de que en el estudio de Verdaguer-Codina et al.(1995a) y el presente se difiera, en parte, es debido a las horas en que se corrieron las pruebas. En aquel caso fue al atardecer, mientras que en el presente fue por la mañana.

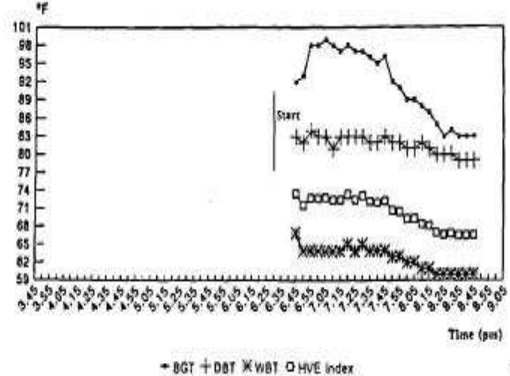
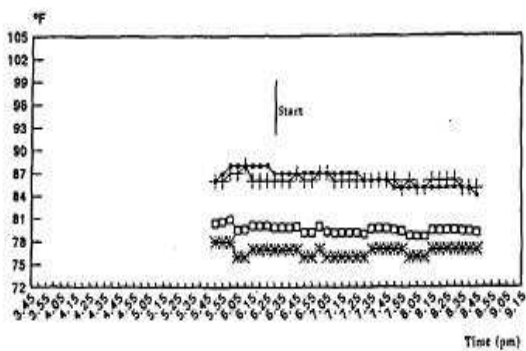
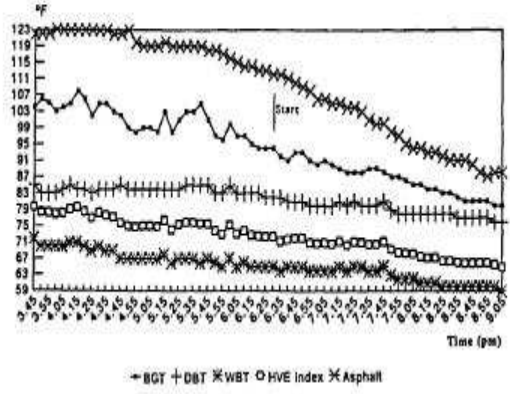
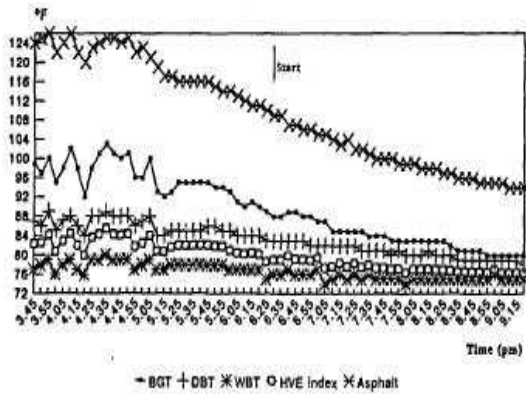
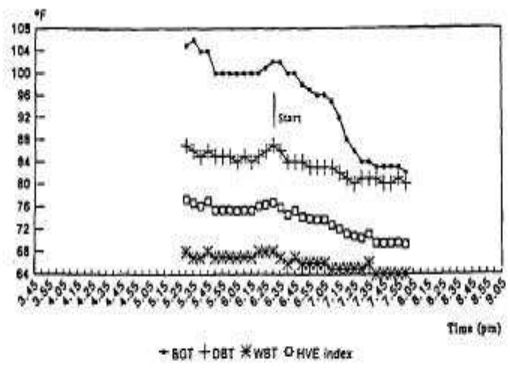
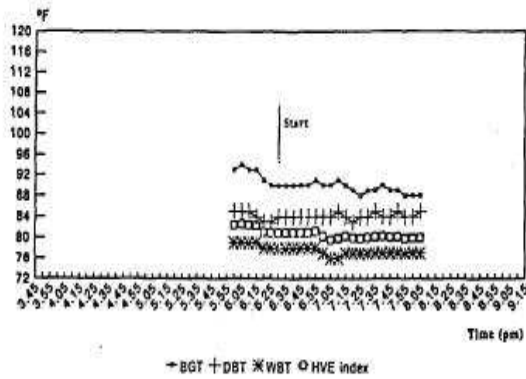


FIGURE 6 Measurements taken at two sites along the course (top, at 20 km; middle, at 10 m in front of Olympic Stadium south entrance) and in the Olympic stadium (bottom) before and during the Olympic women's marathon.

FIGURE 10 Measurements taken at two sites along the course (top, middle) and in the Olympic stadium (bottom) before and during the Olympic men's marathon.

Figura 3.18 Maratón de mujeres (izquierda) y hombres (derecha) Verdaguer-Codina et al. (1995a)

3.4 Relaciones entre las variables

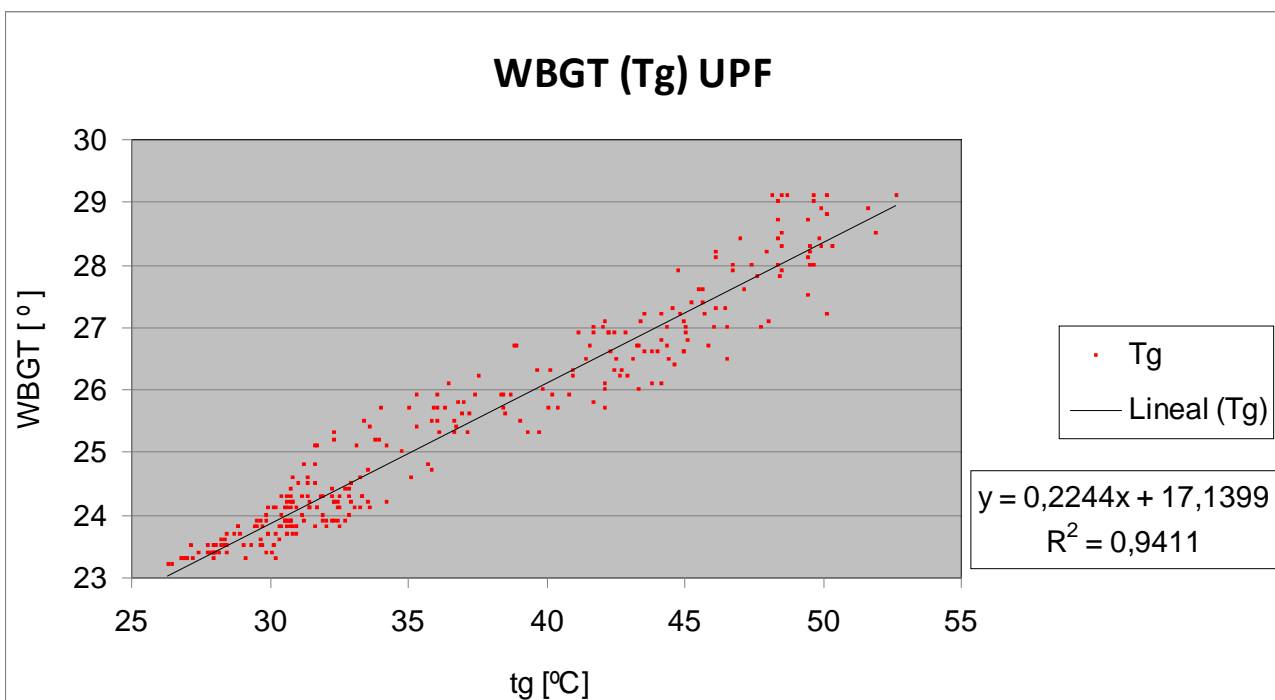
3.4.1.. Relación entre WBGT y el resto de variables

A parte de estudiar las diferencias entre los valores de los índices, también hemos querido analizar las posibles relaciones entre ellas más allá de la conocida $WBGT=0,1t + 0,2t_g +0,7 t_N$..Para ello se ha relacionado el índice térmico WBGT con cada una de las variables y se ha obtenido que con la temperatura del globo negro ha sido siempre muy buena. Se ha podido establecer una buena correlación entre ambas variables, pudiendo decir de manera aproximada que:

$$WBGT=0,2t_g +18 \tag{3.1}$$

donde la t_g está expresada en grados centígrados y el índice térmico en grados (Figuras 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22).

Figura 3.19 Relación entre el índice WBGT y la temperatura del globo negro, a partir de los datos de la UPF el 31 de julio



Ídem 3.20 Ídem, del 1 de agosto

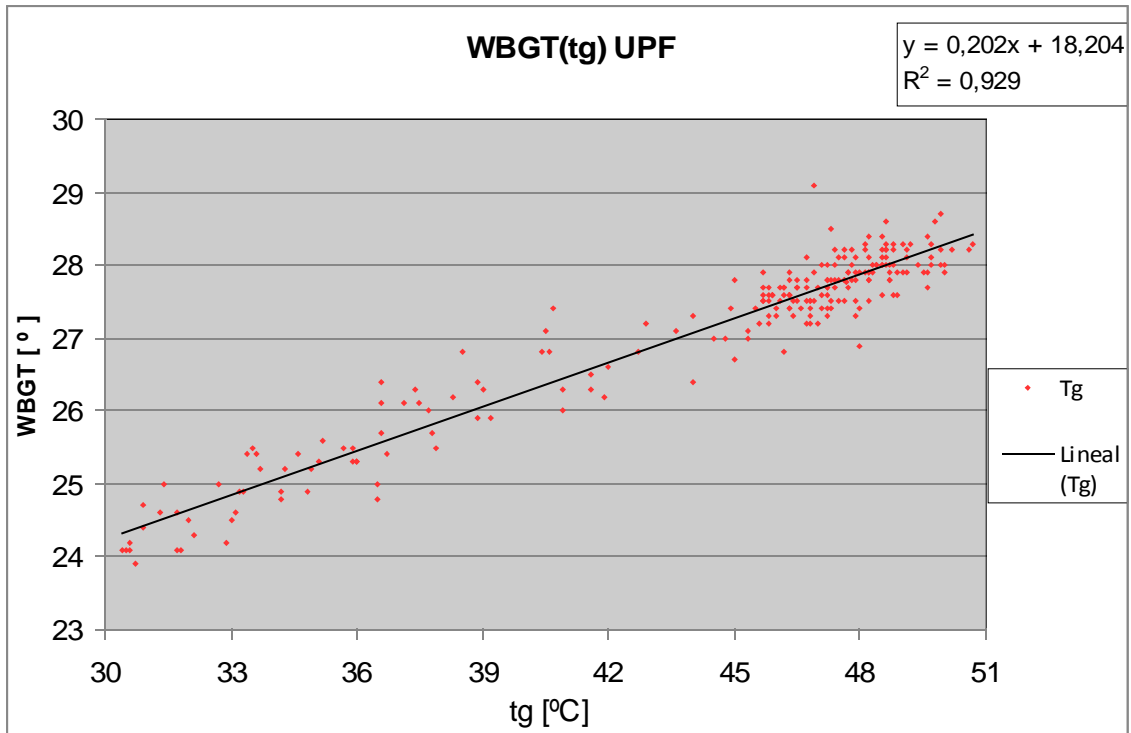


Figura 3.21 Relación entre el índice WBGT y la temperatura del globo negro en la UB el 31 de julio

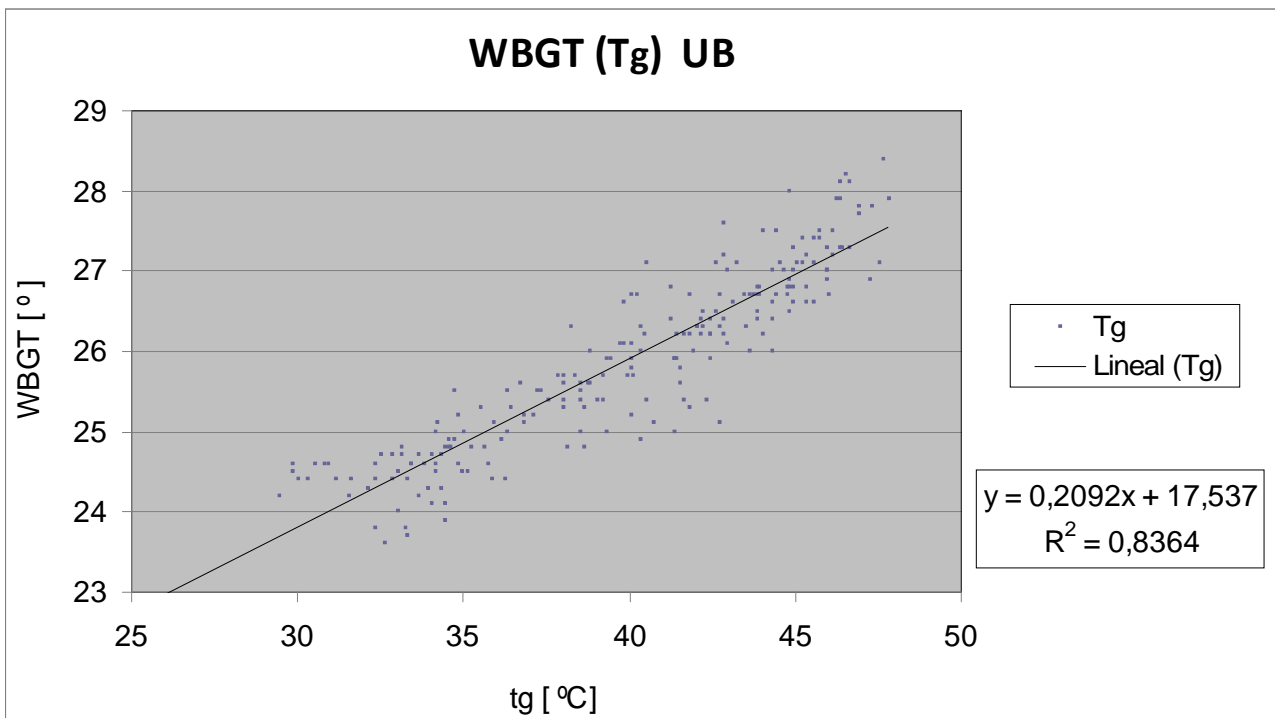
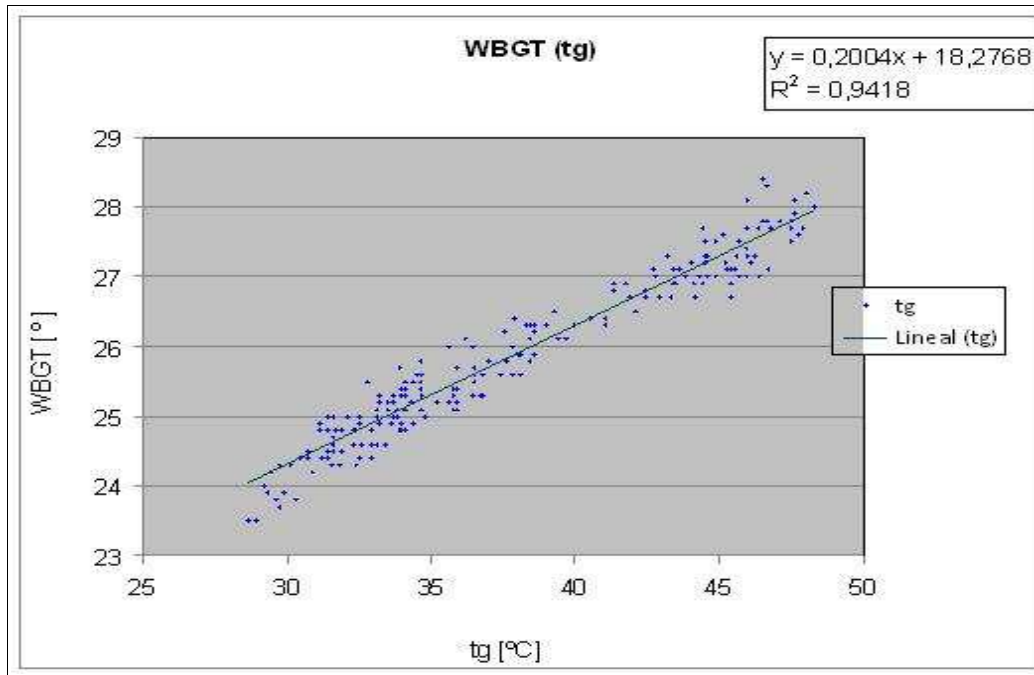


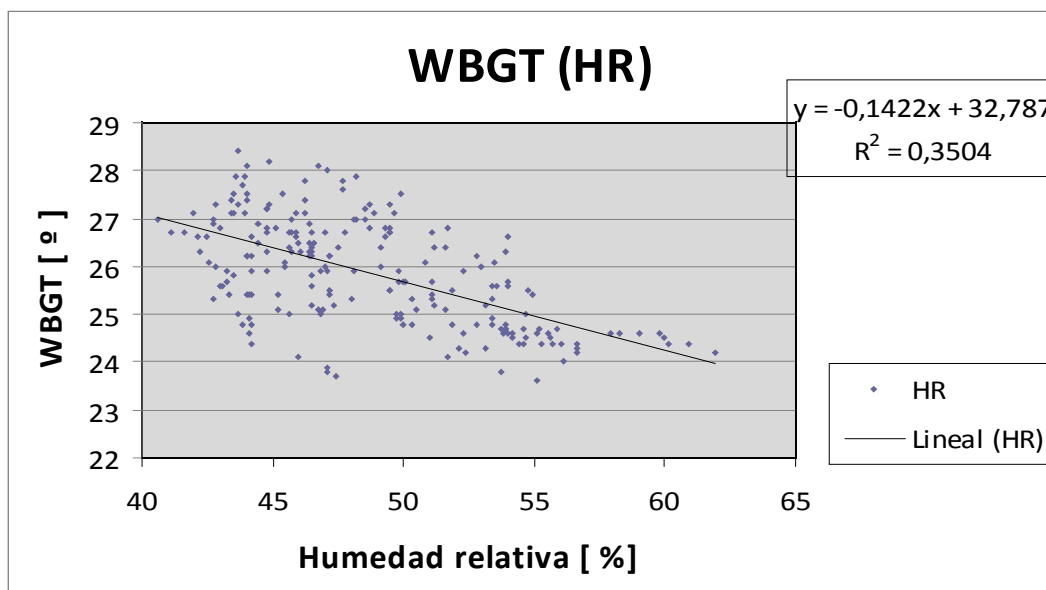
Figura 3.22 Ídem del 1 de agosto



Dado que la humedad relativa tienen también una gran importancia en el valor del índice de estrés térmico WBGT, se ha analizado la correlación entre ambas variables (figuras 3.23, 3.24, 3.25 y 3.26)

En ese caso la relación encontrada han tenido un coeficiente de correlación muy inferior, amén de una correlación negativa. Esto último se debe a que se ha calculado por la mañana, que mientras aumentaban el resto de variables, disminuía la humedad relativa.

Figura 3.23 Relación entre el índice WBGT y la humedad relativa el 31 de julio UB



Ídem 3.24 Ídem 1 de agosto

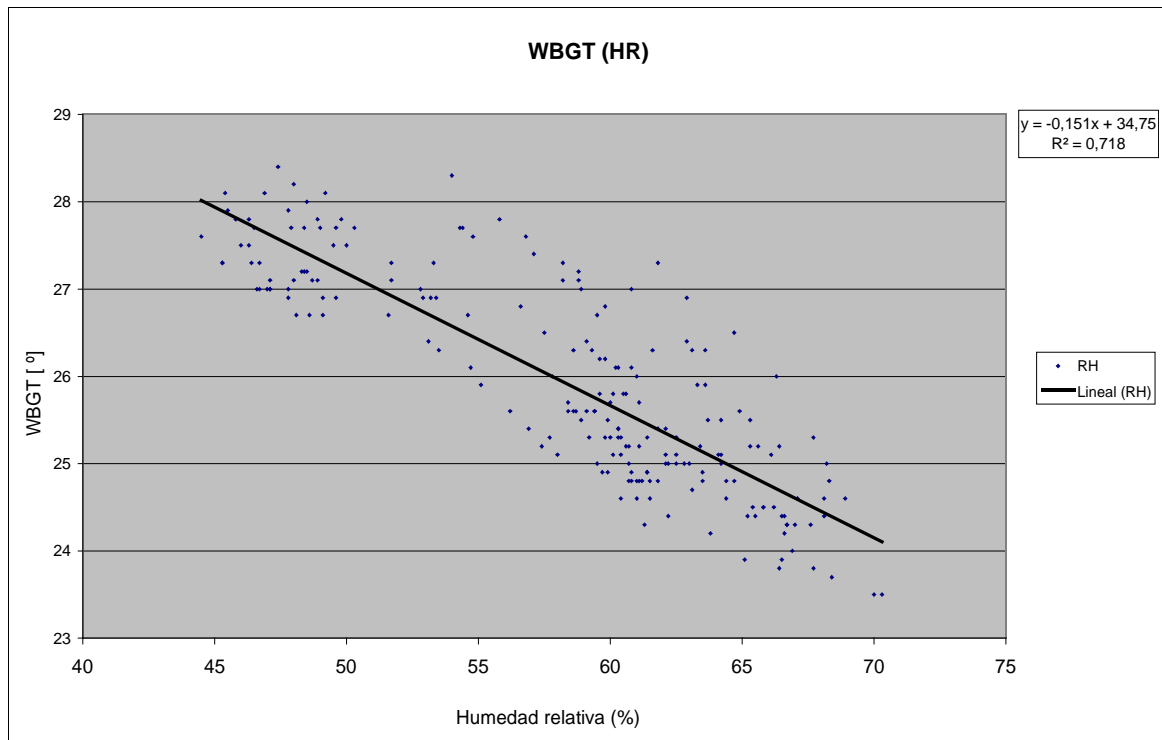


Figura 3.25 Relación entre WBGT y a la humedad relativa en la UPF el 31 de julio

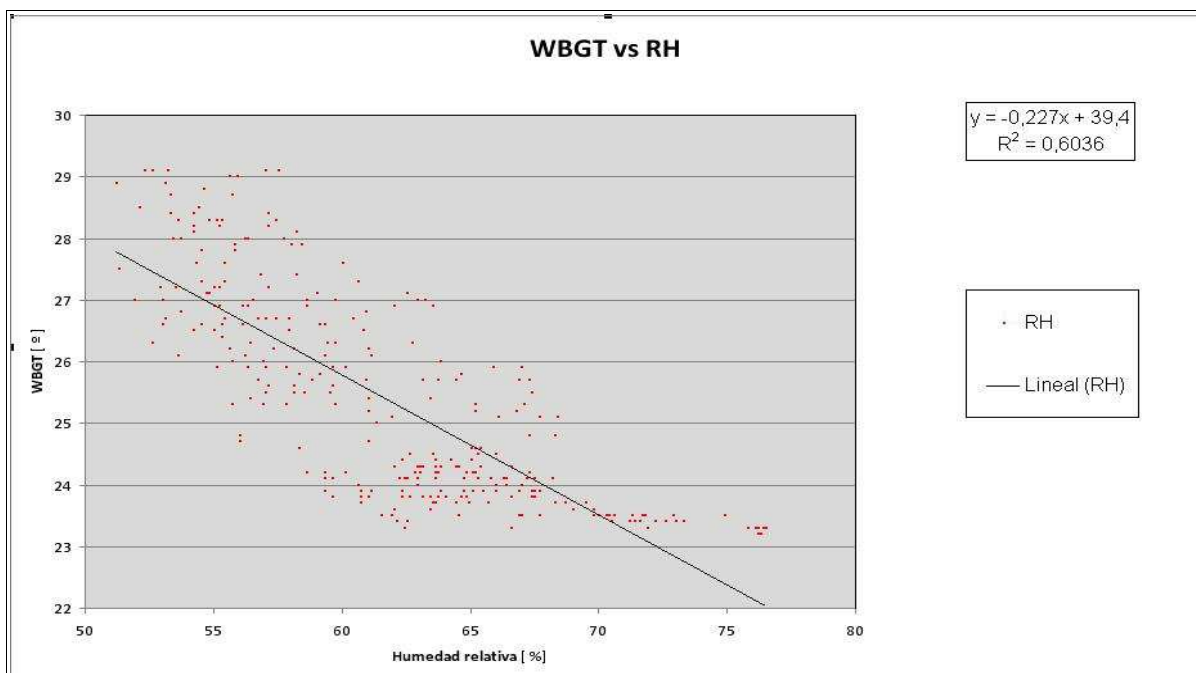
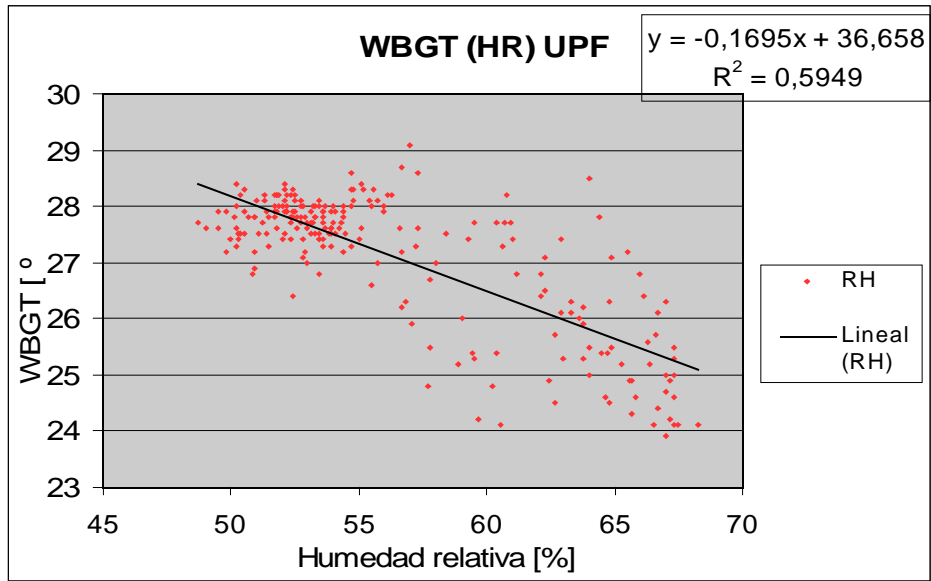


Figura 3.26 Ídem 1 de agosto



Las figuras (3.27 a 3.30) muestran la correlación entre la temperatura del aire y el índice WBGT en grados. En los cuatro casos consideramos que se han obtenido una buena correlación con coeficientes superiores al 0.7.

Figura 3.27 Relación entre el índice WBGT en la UB con la temperatura del aire (31 de julio)

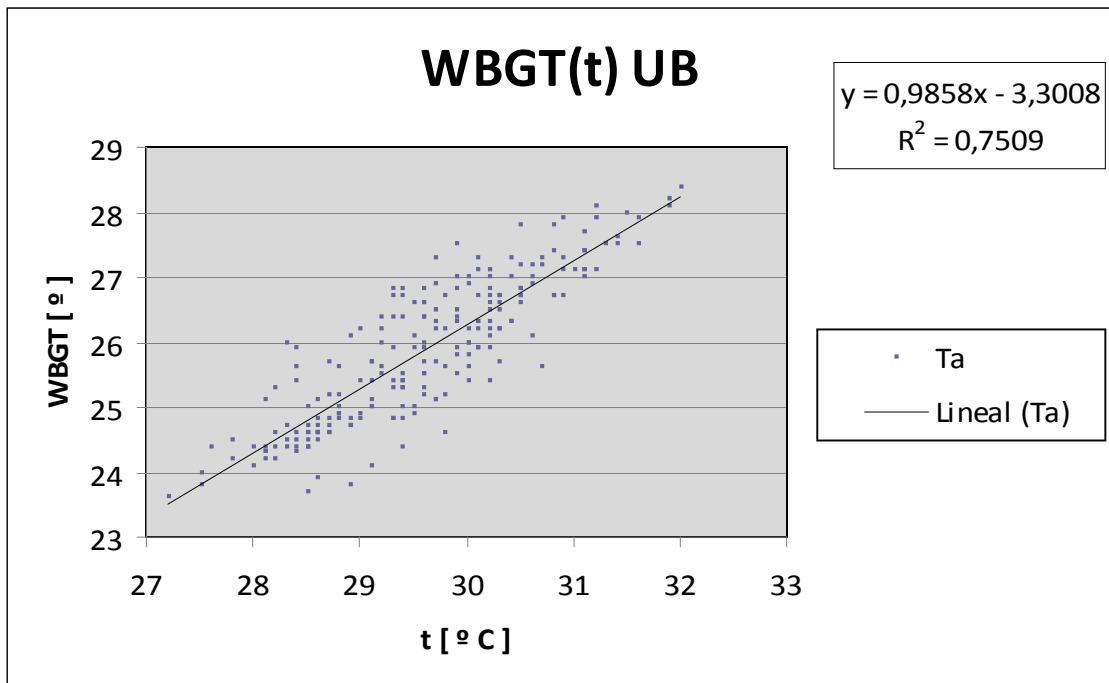


Figura 3.28 Ídem pero el 1 de agosto

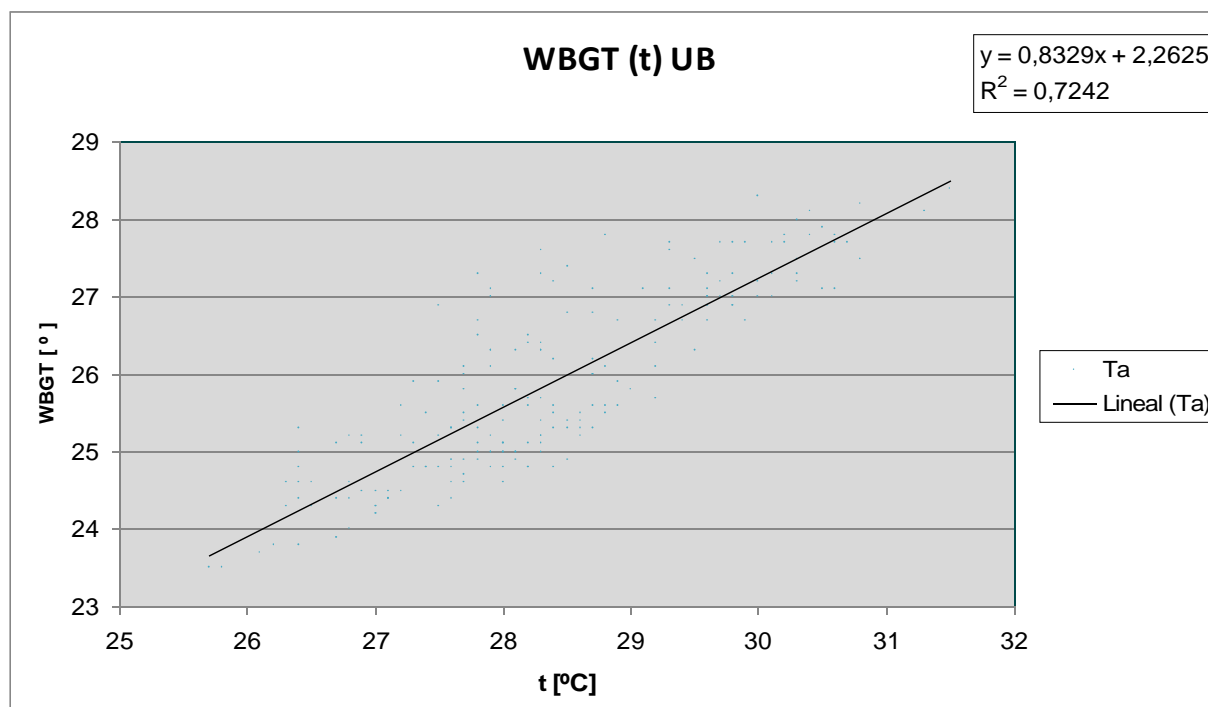


Figura 3.29 Relación entre el índice WBGT y la temperatura del aire en la UPF (31 de julio)

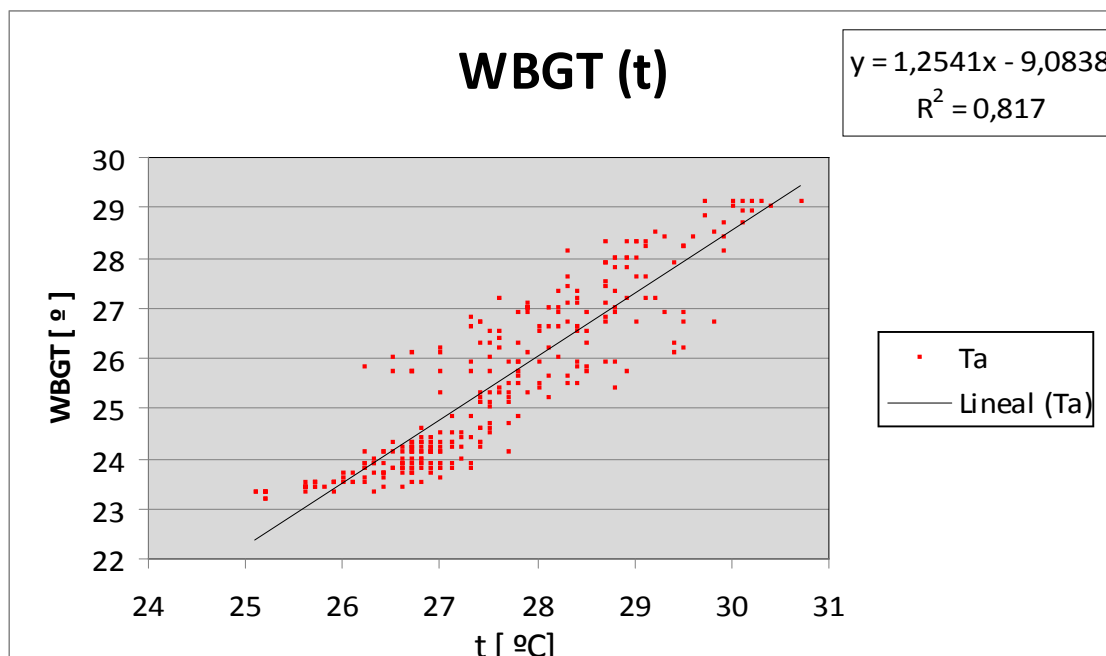
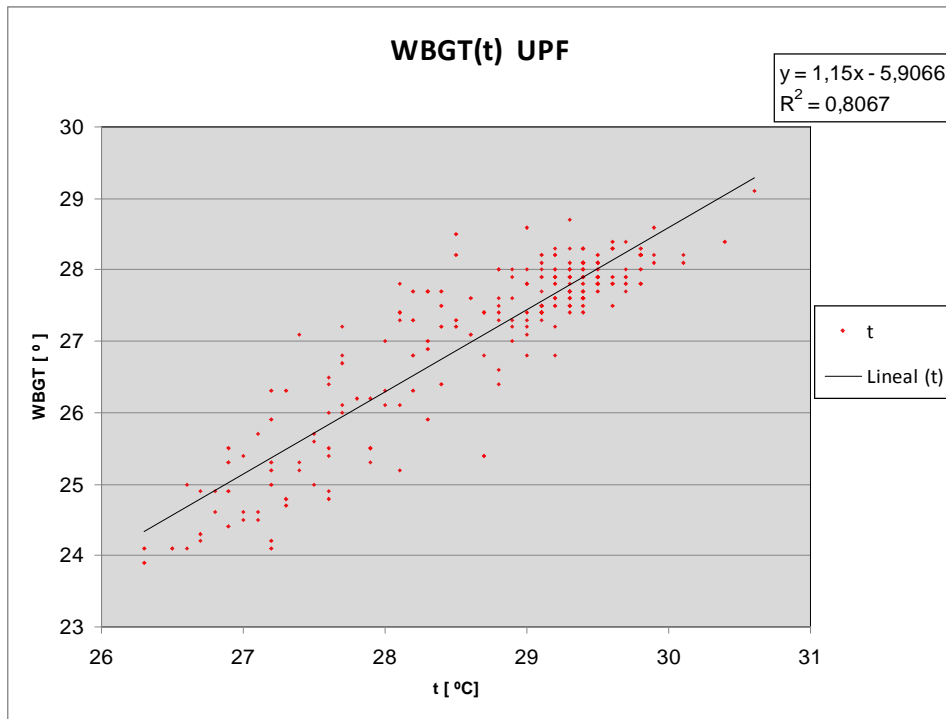


Figura 3.30 Ídem el 1 de agosto



3.4.2 Cálculo de la temperatura del globo negro

Dada la dificultad de resolver de manera rápida la ecuación de 4º grado que permite conocer la temperatura del globo negro (t_g), se ha aplicado la fórmula propuesta por Turco et al. (2010) que establece que la temperatura del globo negro se puede calcular (con su error) a partir de la radiación solar y la temperatura del aire según la ecuación,

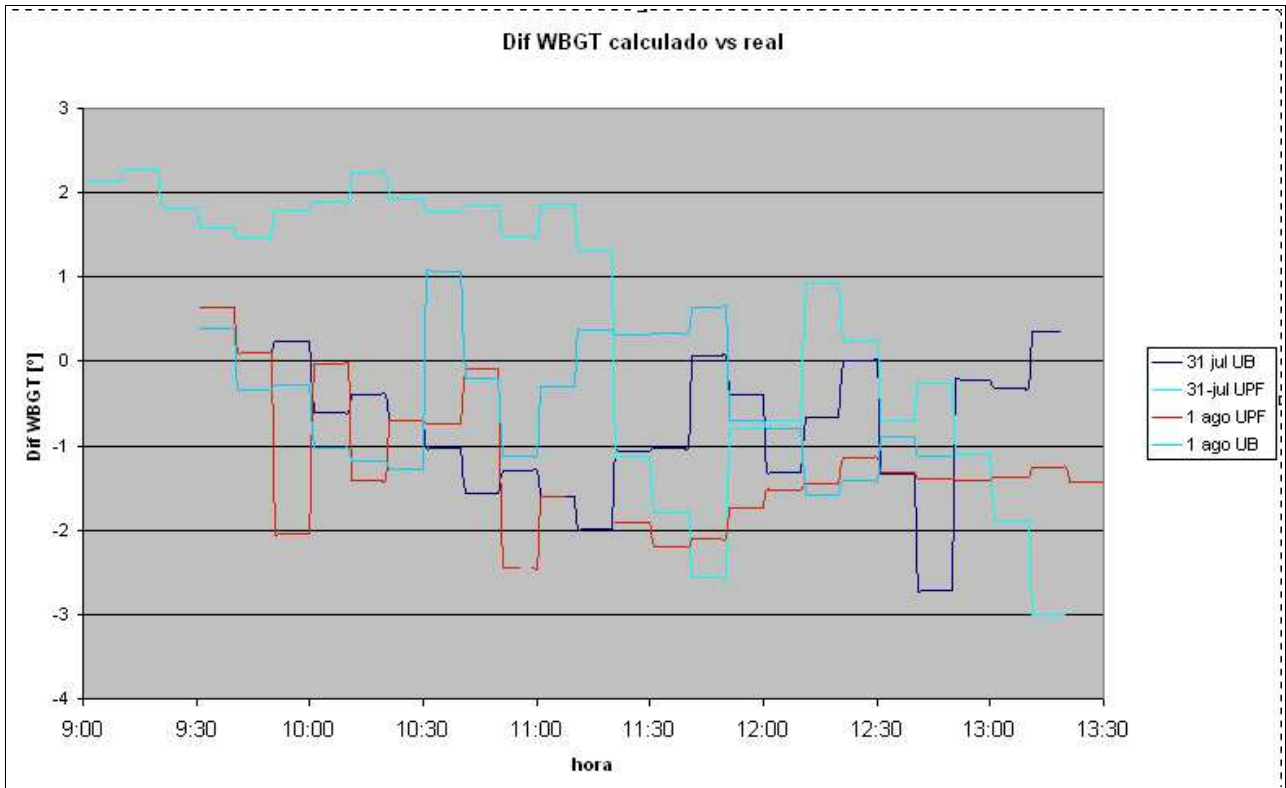
$$t_g = (1.360t - 2.358)(0.0747 * \ln(S) + 0.5617) \quad (3.2)$$

siendo S la radiación total incidente y t la temperatura del aire.

En la figura 3.31 se compara la temperatura del globo negro t_g medida directamente con la obtenida a partir de la ecuación 3.2. Los resultados se son satisfactorios ya que no se superan los 5°C de diferencia y permiten, por tanto, calcular aproximadamente el índice WBGT únicamente a partir de la radiación global y la temperatura del aire, ya que como se ha explicado anteriormente, hay una muy buena correlación entre el índice y la temperatura del globo negro.

La figura 3.32 muestra que las diferencias entre el índice de estrés térmico medido directamente y calculado la ecuación de Turco et al. (2010) no han superado los 3°.

Figura 3.31 Diferencia entre el valor 10-minutal del índice WBGT indicado y el calculado según Turco et al. (2010)



4.-Conclusiones

De los resultados obtenidos en este trabajo podemos destacar que existe una correlación entre la temperatura del globo negro (t_g) y el índice térmico WBGT, de forma que la relación entre ambas variables que se ha encontrado en este estudio ha sido

$$\text{WBGT} = 0.2 \cdot t_g + 18^\circ$$

Las medidas del índice térmico WBGT realizadas durante la celebración de las maratones masculina y femenina de los campeonatos europeos de atletismo de Barcelona 2010, han mostrado que en ambas competiciones se superaron los umbrales del índice de estrés térmico que desaconseja la práctica deportiva intensa ($\text{WBGT} > 18^\circ$).

Las medidas del índice durante los campeonatos en dos puntos del recorrido han demostrado que las condiciones ambientales pueden variar sustancialmente de un lugar a otro, de forma que los valores obtenidos en un punto, no pueden considerarse representativos de todo el recorrido.

Se ha comprobado que la ecuación propuesta por Turco et al. (2010) para la determinación de la temperatura del globo negro (t_g) permite calcular con buena aproximación el índice térmico WBGT utilizando únicamente la temperatura del aire y al radiación global.

Dada la importancia de la radiación solar directa en el valor del índice térmico WBGT y la gran variación que ésta puede experimentar a lo largo del recorrido de una prueba como la maratón en una gran ciudad, los resultados obtenidos en este trabajo aconsejan medir el índice en aquellos lugares donde la radiación solar pueda estar afectada por condiciones locales (lugares totalmente despejados y expuestos al aire, zonas con arbolado o edificios altos, etc.).

Bibliografía

- AEMET (2009): Calendario Meteorológico 2010, Agencia Estatal de Meteorología. pg 188
- AEMET (2011): Valores Climatológicos Normales. Barcelona Aeropuerto. Disponible en la web: <http://www.aemet.es/es/elclima/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=0076&k=cat>
- American Collage of Sports Medicine (ACSM) (1984): American Collage of Sports Medicine position stand on the prevention of thermal injuries during distances running. Sports. Med. Bull, 19:8
- American Conference of Governmental Industrial Hygiennist (1996): Threshold Limit Values (TLVs) for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Expouse indices (BEIs)
- ARÚS DUMENJO, J. (2001): «Reventones de tipo cálido en Cataluña», V Simposio nacional de predicción del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, págs. 1-7 (versión electrónica). <http://www.revistaeria.es/index.php/eria/article/view/653/631>
- BCN 2010 (2010): ‘Barcelona 2010 20th European Athletics Championship’ Disponible en la web: <http://www.bcn2010.org>
- Barris T. (2000): Historia del Maratón femenino. Disponible en la web <http://www.barris.org/noticiaslinks/maratonFemenino.html>.
- Bedingfield, C.H., Drew T.B.(1950): Analogy between heat transfer and mass transfer. *Ind. Eng. Chem.* 42:1164–1173 .
- Budd G. M. (2008): Wet-bulb globe temperature (WBGT)-its history and its limitations. *Journal of Science and Medicine Sport* ,11,20-32.
- Bureau of Australia (2010): Thermal Comfort observations, Bureau of Meteorology.Australian government. Disponible en la web: http://www.bom.gov.au/info/thermal_stress/#wbgt
- Cano M. (2010) 42.195 metros de leyenda Dtlux Disponible en la web: <http://www.dtlux.com/dolcevita/deporte/articulo/maraton-42195-metros-de-leyenda>.
- Casado, F. J., Llobera M., Lopez-Soriano F.J., Soley M., (2010): Cos antic, entorn modern: el nostre cos està preparat per a la vida moderna?, Edicions UB-Omnis Cellula.
- Emes J., Mazumdar S., Rémond C. K., Magee P.C., Kamon, E. (1978): Models for estimate worksite WBGT, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* ,39,592-597.
- Epstein Y., Moran D.S. (2006): Thermal comfort and the heat stress indices, *Ind Health.* Jul.,44 (3),

388-98.

- Extech 2006: (manual del aparato)
- Fernandez-Raga M., Tomás C., Fraile R. (2010): Human mortality seasonality in Castile-León, Spain, between 1980 and 1998: the influence of temperature, pressure and humidity, Int. J. Biometeorol.
- Ferrer R., Dalmau I. (2004): Revisión del concepto de carga mental: evaluación, consecuencias y proceso de normalización, Anuario de Psicología, 35, 521-545.
- Freitas C. R, Dawson N. J., Young A., Mackey W. J. (1985): Microclimate and heat stress of runners in mass participation, Journal of climate and applied meteorology, 24,184-191.
- Fisher B., Joffre S., Kukkuonen J., Piringer M., Rotach M., Schatzmann M. (2005): Meteorology applied to urban air pollution problems, Final Report COST Action 715. Demetra Ltd Publishers.
- Gaspar A.R., Quintela D.A. (2009): Physical modelling of globe and natural wet bulb temperatures to predict WBGT heat stress index in our outdoor environments, Int J Biometeorol ,53, 221-230.
- Gran Enciclopedia del Mundo (1970). Ediciones Durvan ,12, 618
- Haldane J.S. (1905): The influence of high air temperature, J. Hyg. 5, 494–513.
- Hegedüs J. (2001): Historia de la Maratón, Efdportes.com 32
- Hidalgo de la Vega M.J., Sayas Abengochea J.J., Roldán Hervas J. M. (1998): Historia de la Grecia antigua. Universidad de Salamanca.
- Historia del Atletismo (2008): Historia del Atletismo, Historiadelatletismo.net Disponible en la web: <http://www.historiadelatletismo.net>.
- Houghton D.D., Driscoll D.M. (1985): Handbook of Applied Meteorology, Capítulo 29 pg 778-814 John Wiley & Sons.
- Houghton FC, Yaglou CP (1923): Determining equal comfort lines. Journal American Society Heat Vent Engrs,29, 165–76.
- Hunter C. H., Minyard C. O.(1999): Estimating web bulb globe temperature using standard meteorological measurements, 2nd Conference on Environmental Applications
- ICC (2010): Mapserver del Institut Cartogràfic de Catalunya, Disponible en la web: <http://www.icc.cat/eng/Home-ICC/Inicio>

- Liljegren JC, Carhart RA, Lawday P, Tschopp S, Sharp R.(2008): Modeling the Wet Bulb Globe Temperature using standard meteorological measurements. *J Occup Environ Hyg*,5:645–55
- Lopez Donaire D. (2010): Historia del maratón: un error de 200 kilómetros,Muy Interesante septiembre, 2010.
- “Maratón Quijote” (2011): Maratón de Ciudad Real. Historia disponible en la web: <http://www.maratonclm.net/historia.asp>
- Marlín D. J. (2007): The effect of thermal environmental conditions on the health and performance of horses. Disponible en la web: <http://www.davidmarlin.co.uk/PDFs/Environmental%20Conditions%20MARLIN%20v1.pdf>
- Martín-Chivelet J., Muñoz-García M. B., Edwards R.L, Turrero M.J. Ortega A. I. (2011): Land surface temperature changes in Northern Iberia since 4000 yr BP, based on $\delta^{13}\text{C}$ of speleothems,77, Issues 1-2,1-12.
- Minard D., H.S. Belding and J.R. Kingston (1957): Prevention of heat casualties, *Journal American Medicine Association*,165, 1813–1818.
- Minard D. (1961): Prevention of heat casualties in Marine Corps recruits, *Military Medicine*, 126,261–272.
- Minard D. (1964): Effective temperature scale and its modifications. Research Report MR, Report No. 6. Bethesda, MD: Naval Medical Research Institute.
- Ochoa de la Torre S. (1999): European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research -COST Action 11.
- Ohashi Y., Kawabe T., Shigeta Y., Hirano Y. ,Kusaka H., Fudeyasu H.,Fukao K.(2009): Evaluation of urban thermal environments in commercial and residential spaces in Okayama City, Japan, using the wet-bulb globe temperature index, *Theor Appl Climatol*,95:279–289
- Oke T.R. (1987): *Boundary layer climates*, Second edition. London and New York, Routledge.
- Papanastasiou D., Melas D., Bartzanas T.,Kittas C.(2010): Temperature, comfort and pollution levels during heat waves and the role of sea breeze, *International Journal of Biometeorology*,54,3, 307-317.
- Parsons K (2006): Heat Stress Standard ISO 7243 and its global application. *Ind Health* 44:368–379
- Pérez-Alonso J., Callejón-Ferre A.J., Carreño-Ortega A., Sánchez-Hermosilla J. (2011): Approach to the evaluation of the thermal work environment in the greenhouse-construction industry of SE

Spain. Building and Environment, 46, 1725-1734.

•Pericot García, L. (1931): La Grecia en el Siglo V., Historia Universal: Novísimo estudio de la Humanidad” T. I: Edad Antigua. Pg 435 Publicaciones del Instituto Gallach de Librería y Ediciones. Barcelona

•Pilatowsky-Figueroa I.(2002): Psicrometría: Métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Cursillo. Julio 2002. Universidad de Guadalajara. Guadalajara,

Jalisco, México. web: <http://www.ucm.es/info/fisatom/docencia/Masterfisica/Renovables/info%20complementaria/psicrometria.pdf>

•Pujol, P., Verdaguer-Codina, J.(1991): Evaluating climatological conditions in the Olympic Games Barcelona 1992: Discussion at the meeting of the IOC Medical Commission during the Second IOC World Congress. II IOC World Congress, Barcelona October 27-31.

•Real Federación Española de Atletismo.(2011): Historiales de Competiciones - Campeonatos de España y Selección Española Disponible en la web: <http://www.rfea.es/historia/historia.htm>

•Rogers R. R., Yau M. K.(1989): A short course in cloud physics. 3rd edition Pergamon press.

•Ruíz Costa M.C. (1998): Historia del maratón. Ediciones Universidad de Salamanca.

•Saladié, M. (2008): Ambient tèrmic per calor, Departament de Treball. Generalitat de Catalunya.

•Schickele E. (1947): Environment and fatal heat stroke_ an analysis of 157 cases occurring in the army in the U.S. during World War. Milit Surg 100, 235-56.

•Stull R. (1988): An Introduction to boundary layer meteorology Dordrecht [etc.] : Kluwer Academic.

•Turco S. H. N., da Silva T. G. F, de Oliveira G. M., Mario Leitão M. V. B. R.; de Moura M. S. B., Carolina Pinheiro; da Silva Padilha C. V. (2010): Estimating Black Globe Temperature Based on Meteorological Data.

•Vera N.(2005): Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península Ibérica, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya

•Verdaguer-Codina J., Martín D.E., Pujol-Amat P., Ruiz A., Prat J.A. (1995a) Climatic heat stress studies at the Barcelona Olympic Games ,1992. Sports Med. Training and Rehabilitation. 6, 167-192

•Verdaguer-Codina J., Pujol J., Rodriguez A., Ortiz E. (1995b): Predictive climatology for the olympic marathon and race walking events in Barcelona 1992. Sports Med. Training and

Rehabilitation. 6, 7-13.

•Vernon HM, Warner CG (1932): The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures. J. Hyg., 32, 431–62.

•Vihma T (2010): Effects of weather on the performance of marathon runners. Int. J. Biometeorol., 54,297–306

•WMO Guide (2008): Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorology Organization, séptima edición

•Yaglou C.P. y Minard D.(1957): Control of heat casualties at military training centers, Am. Med. Assoc. Arch. Ind. Health., 16, 302–316.

•Yaglou CP (1960): Communication Item 918 to Human Thermal Environments Laboratory. Loughborough University, UK.

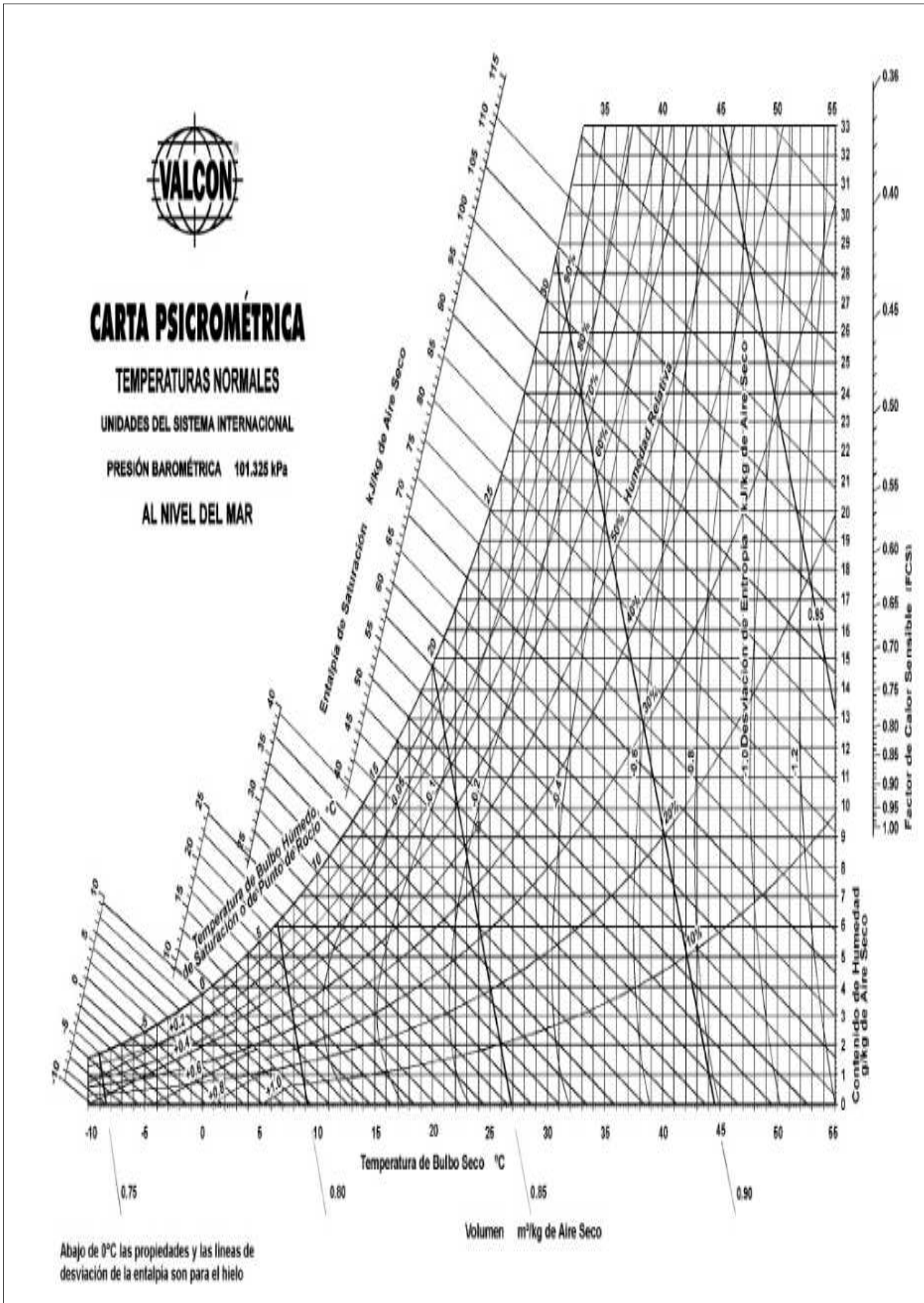
•Zang Athens (1982): Citado en Stull R.(1988): An Introduction to boundary layer meteorology, Dordrecht [etc.] : Kluwer Academic, 1988.

• Otras webs de interés:

www.historiadelatletismo.net/historia-maraton

www.efdeportes.com/efd32/maraton.htm

Anexo 1 Tabla psicrométrica gráfica



y de manera numérica (González Martínez 2009).

Temperatura (°C) del termómetro seco	Diferencia (°C) entre las temperaturas del termómetro seco y húmedo																			
	0,0°	0,5°	1,0°	1,5°	2,0°	2,5°	3,0°	3,5°	4,0°	4,5°	5,0°	5,5°	6,0°	6,5°	7,0°	7,5°	8,0°	8,5°	9,0°	9,5°
0	100	90	80	72	64	55	48	42	35	30	24	19	15	10	5	-	-	-	-	-
1	100	90	80	73	64	55	48	42	35	30	24	19	15	10	5	-	-	-	-	-
2	100	90	81	73	64	55	48	42	35	30	24	19	15	10	5	-	-	-	-	-
3	100	91	83	74	65	57	48	43	35	30	24	19	15	10	5	-	-	-	-	-
4	100	91	83	75	66	59	50	45	35	30	24	19	15	10	5	-	-	-	-	-
5	100	92	84	76	68	60	52	48	38	31	24	19	15	10	5	-	-	-	-	-
6	100	92	85	77	70	62	55	50	41	34	27	20	15	10	5	-	-	-	-	-
7	100	92	85	77	71	63	57	52	44	37	30	24	18	12	5	-	-	-	-	-
8	100	93	86	79	72	65	58	53	46	40	33	27	21	15	9	3	-	-	-	-
9	100	93	86	79	73	66	60	54	48	42	35	30	24	18	13	7	3	-	-	-
10	100	93	87	80	74	68	62	56	50	44	38	33	27	21	16	10	5	-	-	-
11	100	93	87	82	75	69	62	57	52	46	40	35	30	24	19	13	8	4	-	-
12	100	93	87	82	76	70	63	58	53	48	42	37	32	27	22	17	12	7	-	-
13	100	93	88	82	77	71	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	6	-
14	100	94	88	83	77	72	66	61	56	52	47	42	37	32	27	23	18	13	9	6
15	100	94	89	83	78	73	67	62	57	53	49	44	39	34	30	25	21	17	12	8
16	100	94	89	83	79	74	69	63	59	55	50	46	41	36	32	27	23	19	15	11
17	100	95	90	84	80	75	70	64	60	56	52	48	43	38	34	30	24	22	18	14
18	100	95	90	85	80	76	71	65	61	57	53	49	45	40	37	32	28	24	20	16
19	100	95	90	85	81	77	72	66	62	58	55	51	47	42	38	34	30	27	23	20
20	100	95	90	85	82	77	72	68	63	60	56	52	48	44	41	37	32	29	25	22
21	100	95	91	86	82	78	73	69	64	60	57	53	49	46	42	38	34	31	27	24
22	100	95	91	87	82	78	74	70	65	62	57	54	51	47	43	40	37	33	29	27
23	100	95	91	87	83	79	75	70	66	63	58	56	52	48	45	41	38	35	31	28
24	100	95	92	87	83	79	76	71	67	63	60	57	53	50	46	43	39	37	33	30
25	100	96	92	87	83	80	76	72	68	63	61	58	54	51	48	45	41	38	35	32
26	100	96	92	87	84	80	77	73	69	65	62	58	56	52	48	46	42	39	37	33
27	100	96	92	88	84	81	77	73	70	66	62	59	57	53	50	47	43	39	37	33
28	100	96	92	88	84	81	78	74	70	67	63	60	57	54	51	48	45	42	38	36
29	100	96	92	88	85	82	78	75	71	67	64	61	58	55	52	49	46	43	40	38
30	100	96	93	89	85	82	78	75	72	68	65	62	58	56	53	50	47	44	42	39
31	100	96	93	89	86	82	79	76	73	69	66	63	60	57	54	51	48	45	43	40
32	100	96	93	89	86	83	79	76	73	70	67	63	60	58	55	52	49	47	43	41
33	100	96	93	89	86	83	80	77	73	70	67	64	61	58	56	53	50	48	45	43
34	100	96	93	90	87	83	80	77	74	71	68	64	62	59	57	53	51	48	46	43
35	100	96	93	90	87	83	80	77	74	72	68	65	63	60	58	54	52	49	47	44
36	100	96	93	90	87	83	81	78	75	72	69	66	63	60	58	55	53	50	48	45
37	100	96	93	90	87	84	81	78	75	72	69	67	64	61	59	56	54	51	49	46
38	100	96	93	90	87	84	82	78	76	73	70	68	64	62	59	57	55	52	49	47
39	100	96	93	90	87	84	82	78	76	73	70	68	65	63	60	58	55	53	50	48
40	100	96	93	90	88	85	82	79	77	73	71	68	66	63	61	58	56	53	51	48
41	100	97	93	91	88	85	82	79	77	74	71	69	66	63	61	59	57	54	52	50
42	100	97	93	91	88	85	82	80	77	74	72	69	67	64	62	60	57	55	53	50
43	100	97	94	91	88	85	83	80	77	74	72	69	67	64	62	60	58	55	53	51
44	100	97	94	91	89	86	83	80	78	75	72	71	68	65	63	61	58	56	54	52
45	100	97	94	91	89	86	83	80	78	76	73	70	68	66	63	61	59	57	54	52
46	100	97	94	91	89	86	83	81	78	76	73	71	68	66	63	61	59	57	55	53
47	100	97	94	91	89	86	83	81	78	76	73	71	68	66	64	62	60	57	56	53
48	100	97	94	92	89	86	83	81	78	76	73	71	69	66	64	62	60	57	56	54
49	100	97	94	92	89	87	84	82	79	76	74	72	69	67	65	63	61	59	57	54
50	100	97	94	92	89	87	84	82	79	77	74	72	69	67	65	63	61	59	57	55

Anexo 2 Programa para la resolución de la temperatura del globo negro

```
C   Calculo de la Tg
    real tg0,ta,tg1,sigma
    integer i
    parameter(sigma=5.67e-8)

C   Como es una función sin solución exacta, lo resolvemos por iteración
C   utilizando el método de Newton. Para usar, debido a que sigma tiene
C   unidades de 1/kelvin, lo calculamos con estas unidades.

    Tg0=ta+273.15

    do i=1,100000
C   tg1= Tg0- f(tg0,u)/(0.115*(u**0.58)+ 4*0.95*sigma*(Tg0**3)

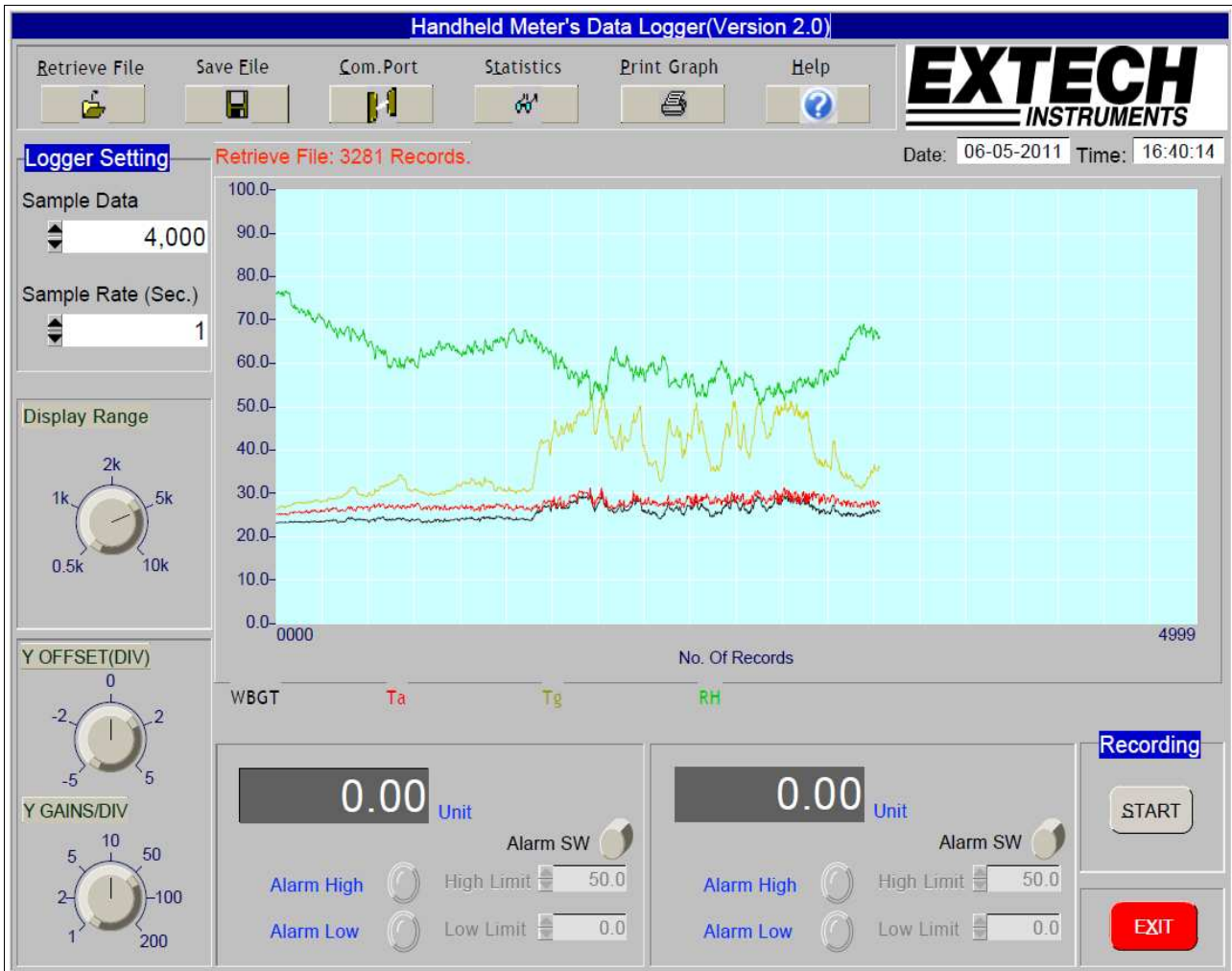
        tg1= Tg0- (0.95*sigma*(tg0**4)+ 0.115*u**0.58*tg0
& -0.05*stotal*(fdir/(4*cos(z))+(1+albedo)*fdif)
& -0.575*ea*0.95*sigma*(ta**4)+0.115*(u**0.58)*ta)
& /((0.115*(u**0.58)+ 21.546e-8*(Tg0**3))
C   El límite de 0.02 viene explicado en el artículo de Lilj....

        if(abs(tg1-tg0).le.0.02) goto 20

    enddo
20   tg=tg1-273.15
    print*,tg
    stop
end
```

Anexo 3. Interficie del programa de grabación de datos.

En este caso se muestra la serie del 1 de agosto de la UB, con escala a mostrar 5000 datos.

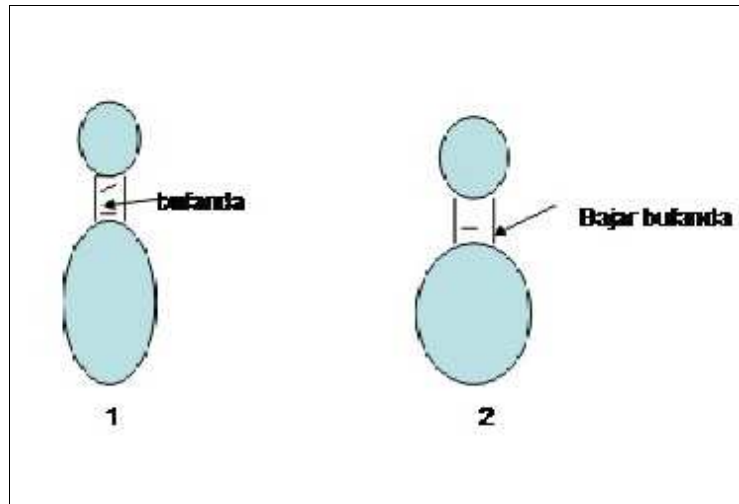


Anexo 4. Manual de instrucciones editado para todos los miembros de las medidas

INSTRUCCIONES

1.- LLEGADA:

-Sacar termómetro



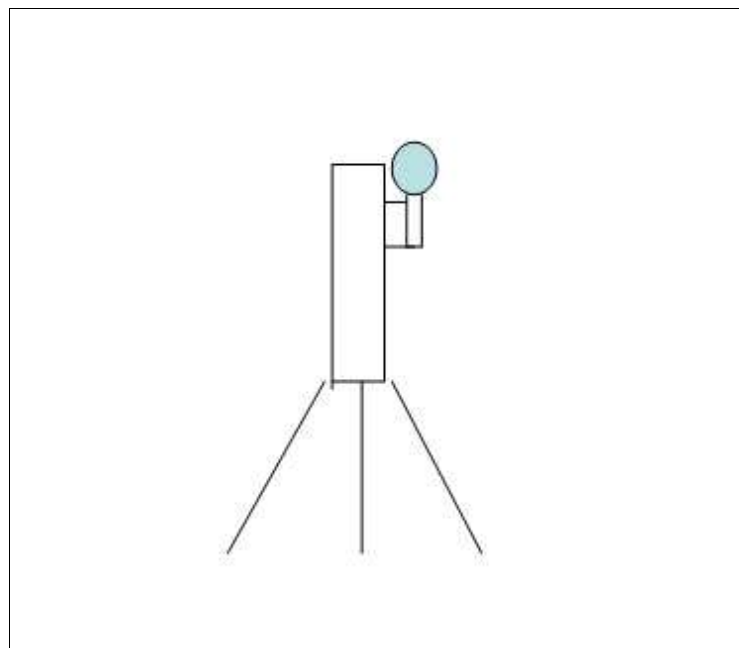
-Bajar bufanda plástico

2.- Paso

- Montar trípode en lugar asfaltado y que haga el máximo viento

- Poner aparato en trípode SIEMPRE en posición vertical: orientado hacia nosotros

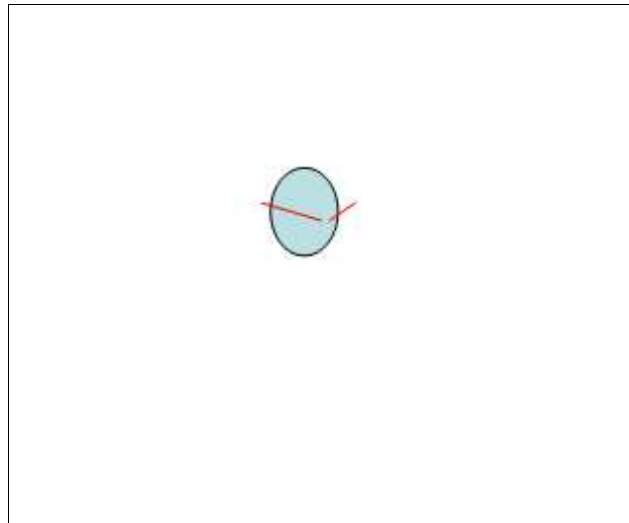
-Subir que todo esté a 1,5m.



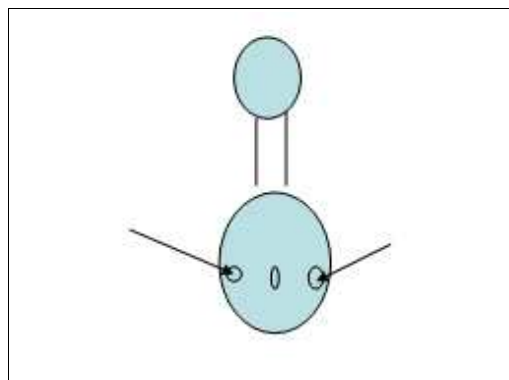
3^{er} PASO

-Conectar ordenador

-Clicar programa HAND-HELD



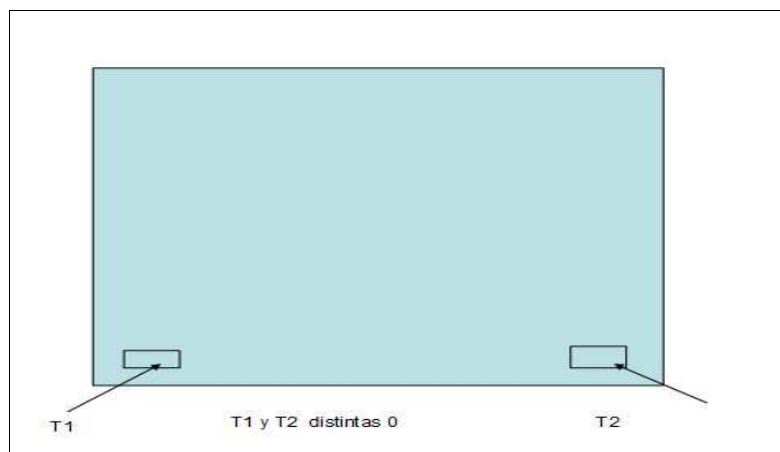
-Conectar puerto USB de aparato a ordenador



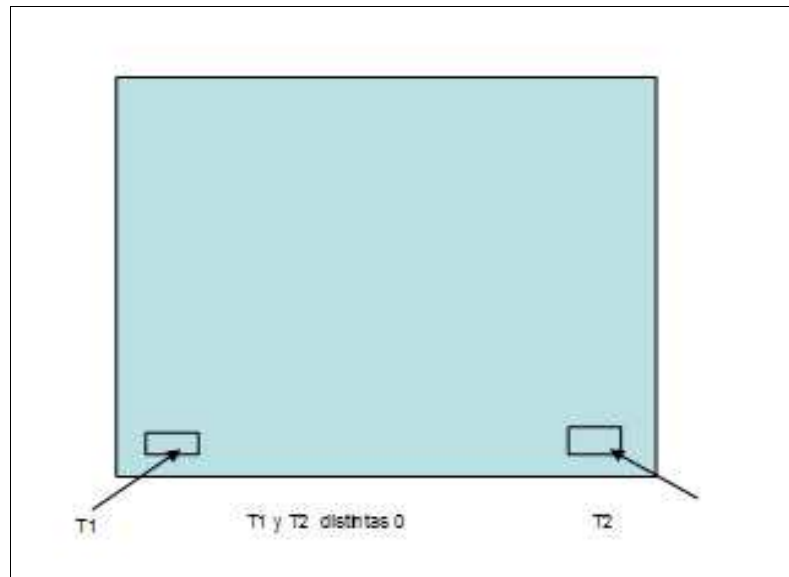
Apretar botones flecha: sale "N" en pantalla

4^o PASO: PANTALLA ORDENADOR

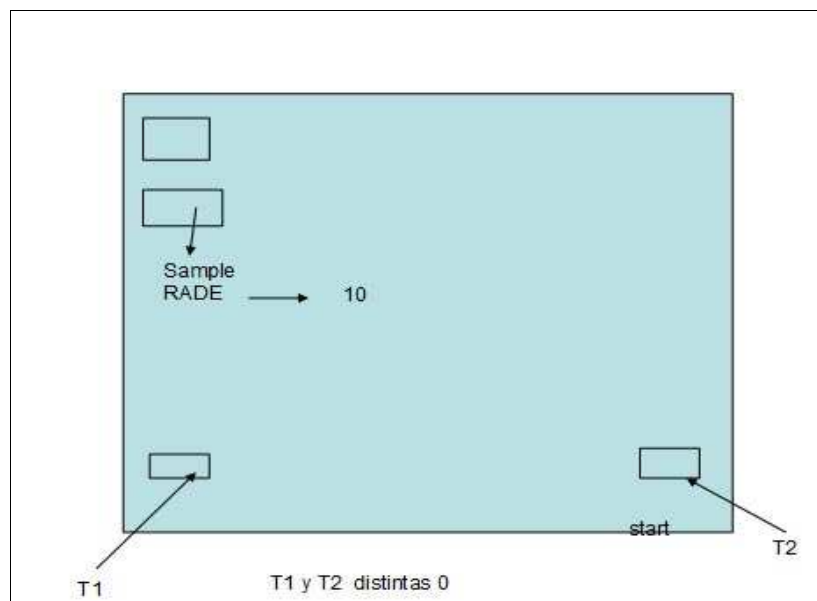
•a)



b)



c)



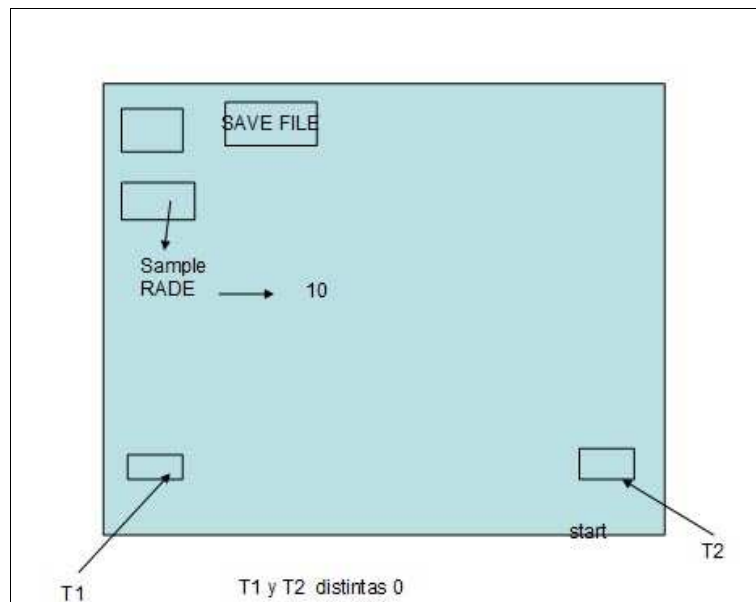
se aprieta "start" y sale "end"

Así ha de estar siempre.

Durante todo el maratón se vigilará:

- Que la T sea distinta a 0
- Que está el "end"

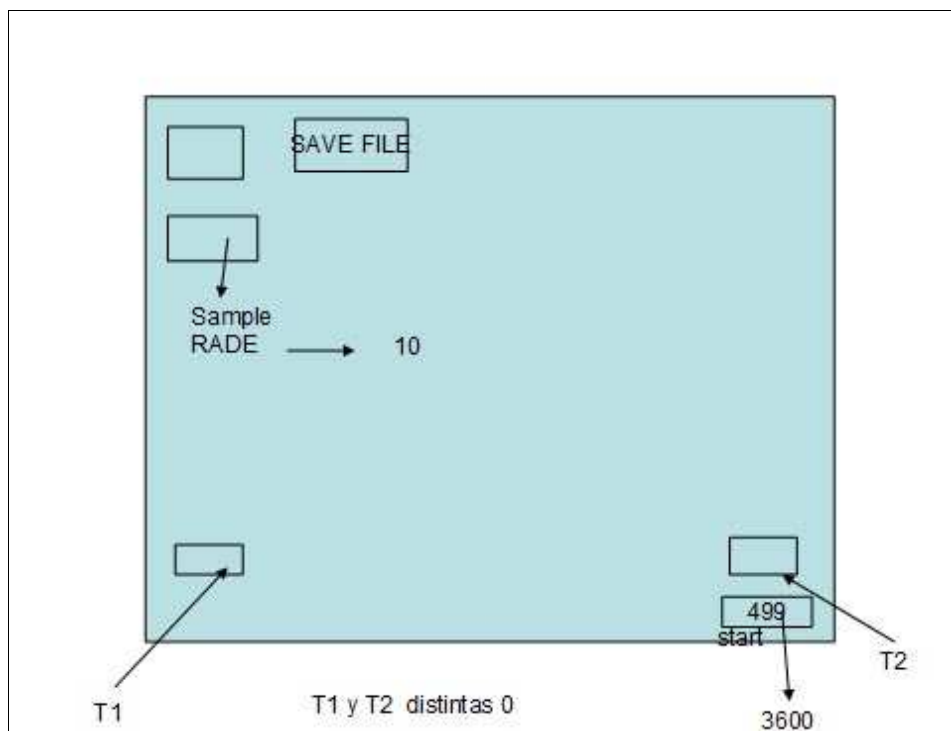
DE VEZ EN CUANDO:



Se aprieta "save file" y se guarda.

Si pasa algo raro, se reinicia y entonces se guarda con otro nombre

Si en vez de 499 sale 3600, se guarda y se reinicia con otro nombre



Se aprieta *END* y se reinicia y se graba en distinto fichero

CASO EXTREMO:

-si falla todo o empieza a fallar se toman medidas de los datos de las horas acabadas en 0 ó 5

-Apuntar datos apretando botón derecho: *MODE*

Anexo 5. Programa 'unificación.f'

```
c Programa que lee el fichero unificado de datos UB y los uniformiza
c con datos cada 10s así como ordena el número de suceso.
integer dsegon,usegon,j,index
real wbgmt,ta,tg,rh,wbgtm,tam,tgm,rhm
character*10 fecha
character*132 cabecera
character*1,c1,c2,c3,h,a
character*6 horamin
open(unit=1, file='maraton_hombres_UB.txt',status='old')
open(unit=2,file='maraton_hombres_UB3.txt',status='unknown')
C Ponemos los valores iniciales a 0
wbgtm=0.0; tam=0.0; tgm=0.0; rhm=0.0; j=0; k=0
read(1,11) cabecera
write(2,11) cabecera
C Llegim el fitxer amb 1s i ho convertim amb un de cada 10s
do i=1,1710

    print*,i
    read(1,10,err=20)index,fecha,horamin,a,dsegon,usegon,
& wbgmt,c1,ta ,c2,tg,c3,rh,h
    print*,rh
C sumamos los datos, y a su vez contamos cuantas veces lo hacemos para la media

    k=k+1
    WBGTM=Wbgtm+wbgmt
    tam=tam+ta
```

```
tgm=tgm+tg
rhm=rhm+rh
```

```
C si la undiad de segundo es 5, hacemos la media y lo escribimos
```

```
20 if(usegon.eq.4) then
```

```
    j=j+1
    wbgm=wbgtm/k
    ta=tam/k
    tg=tgm/k
    rh=rhm/k
```

```
C volvemos a poner los valores a 0
```

```
    wbgm=0.0; tam=0.0; tgm=0.0; rhm=0.0; k=0
    write(2,10)j,fecha,horamin,a,dsegon,usegon,wbgt,c1,ta,
```

```
&    c2,tg,c3,rh,h
```

```
else
```

```
    goto 22
```

```
endif
```

```
if(usegon.eq.5) then
```

```
    j=j+1
    wbgm=wbgtm/k
    ta=tam/k
    tg=tgm/k
    rh=rhm/k
```

```
C volvemos a poner los valores a 0
```

```
    wbgm=0.0; tam=0.0; tgm=0.0; rhm=0.0; k=0
    write(2,10)j,fecha,horamin,a,dsegon,usegon,wbgt,c1,ta,
```

```
&    c2,tg,c3,rh,h
```

```
end if
```

```
22 continue
```

```
end do
```

```
pause
```

```
print*,'final mitjana'
```

```
do i=1,10000
```

```
    read(1,10,end=15)index,fecha,horamin,a,dsegon,usegon
```

```
&    ,wbgt ,c1,ta,c2,tg,c3,rh,h
```

```
    j=j+1
```

```
    write(2,10)j,fecha,horamin,dsegon,usegon,wbgt,c1,ta,
```

```
&    c2,tg,c3,rh,h
```

```
end do
```

```
15 continue
```

```
close(2)
```

```
close(1)
```

```
Print*,'Programa de unificacion ficheros finalizado con exito'
```

```
stop
```

```
10 format(i6,2x,a,1x,a,i1,i1,10x,3(f4.1,12x,a,9x),f4.1,12x,a)
```

c10 format(i6,2x,a,1x,2(i2,a),i1,i1,10x,3(f4.1,12x,a,9x),f4.1,12x,a)

11 format(a)

end

Anexo 6. Lista oficial de corredoras y sus tiempos (31 de julio)

Marathon		31 July			
1	Živilė Balčiūnaitė	LTU	3.4.79	2:31:14	SB
2	Nailya Yulamanova	RUS	6.9.80	2:32:15	
3	Anna Incerti	ITA	19.1.80	2:32:48	SB
4	Tetyana Filonyuk	UKR	5.4.84	2:33:57	
5	Isabellah Andersson	SWE	12.11.80	2:34:43	
6	Olivera Jevtić	SRB	24.7.77	2:34:56	SB
7	Alessandra Aguilar	ESP	1.7.78	2:35:04	SB
8	Marisa Barros	POR	25.2.80	2:35:43	
9	Irina Timofeyeva	RUS	5.4.70	2:35:53	SB
10	Rosaria Console	ITA	17.12.79	2:36:20	SB
11	Silviya Skvortsova	RUS	16.11.74	2:36:31	
12	Lidia Simon	ROU	4.9.73	2:36:52	
13	Deborah Toniolo	ITA	24.4.77	2:37:10	SB
14	Michelle Ross-Cope	GBR	31.1.72	2:38:45	SB
15	Rasa Drazdauskaitė	LTU	20.3.81	2:38:55	
16	Susan Partridge	GBR	4.1.80	2:39:07	
17	Beatriz Ros	ESP	12.5.74	2:40:10	
18	Ana Dias	POR	15.1.74	2:41:02	SB
19	Kirsten Marathon Melkevik	NOR	29.5.70	2:42:24	
20	Holly Rush	GBR	23.9.77	2:42:44	
21	Helen Decker	GBR	12.9.79	2:43:00	
22	Svitlana Stanko-Klymenko	UKR	13.5.76	2:43:35	
23	Anna von Schenck	SWE	25.7.73	2:43:36	
24	Rebecca Robinson	GBR	28.10.82	2:44:06	
25	Jo Wilkinson	GBR	2.5.73	2:44:11	
26	Kjersti Karolin Danielsen	NOR	15.2.79	2:45:00	SB
27	Maja Neuenschwander	SUI	13.2.80	2:45:17	SB
28	Yevgeniya Danilova	RUS	10.8.81	2:46:21	
29	Margarita Plaksina	RUS	1.10.77	2:47:26	
30	Christina Bus Holth	NOR	22.4.80	2:48:15	
31	Olena Biloshchuk	UKR	24.4.87	2:51:21	
32	Gezashign Safarova	AZE	5.2.90	2:51:59	PB
33	Lena Gavelin	SWE	26.2.74	2:53:13	
34	Remalda Kergyte	LTU	25.8.85	2:55:12	
35	Daneja Grandovec	SLO	2.7.84	3:07:51	
36	Vira Ovcharuk	UKR	23.12.80	3:09:27	
	Sladjana Perunović	MNE	26.3.84	DNF	
	Karolina Jarzyńska	POL	6.9.81	DNF	
	Fernanda Ribeiro	POR	23.6.69	DNF	
	Mónica Rosa	POR	5.5.78	DNF	
	Daniela Cîrlan	ROU	18.9.80	DNF	
	Tatyana Pushkareva	RUS	26.9.85	DNF	
	Patricia Morceli Bühler	SUI	11.7.74	DNF	

Anexo 7 Lista de corredores y sus tiempos (1 de agosto)

Marathon		1 August			
1	Viktor Röthlin	SUI	14.10.74	2:15:31	SB
2	José Manuel Martínez	ESP	22.10.71	2:17:50	SB
3	Dmitriy Safronov	RUS	8.10.81	2:18:16	
4	Ruggero Pertile	ITA	8.8.74	2:19:33	
5	Pablo Villalobos	ESP	20.5.78	2:19:56	
6	Rafael Iglesias	ESP	5.7.79	2:20:14	
7	Migidio Bourifa	ITA	31.1.69	2:20:35	
8	Lee Merrien	GBR	26.4.79	2:20:42	
9	Aleksey A. Sokolov	RUS	15.4.83	2:20:49	
10	Luís Feiteira	POR	21.4.73	2:21:28	SB
11	Ottaviano Andriani	ITA	4.1.74	2:21:32	
12	Mariusz Giżyński	POL	26.6.81	2:21:54	
13	Rens Dekkers	NED	29.11.81	2:22:03	
14	Hugo van den Broek	NED	18.9.76	2:22:06	SB
15	Oleg Kulkov	RUS	6.3.78	2:22:24	
16	Dave Webb	GBR	17.3.82	2:23:04	
17	Koen Raymaekers	NED	31.1.80	2:23:24	
18	Günther Weidlinger	AUT	5.4.78	2:23:37	
19	Dan Robinson	GBR	13.1.75	2:24:06	SB
20	Alberto Chaíça	POR	17.9.73	2:24:14	SB
21	Erik Petersson	SWE	17.2.80	2:24:29	
22	Wodage Zvadya	ISR	7.9.73	2:24:39	
23	Ayele Setegne	ISR	11.4.62	2:26:26	SB
24	Ben Moreau	GBR	15.12.81	2:27:08	
25	Oleksiy Rybalchenko	UKR	3.8.76	2:27:34	SB
26	Patrick Stitzinger	NED	25.8.81	2:28:02	
27	Vasyl Matviychuk	UKR	13.1.82	2:28:26	SB
28	Martin Williams	GBR	27.9.77	2:28:30	
29	Jesper Faurschou	DEN	1.7.83	2:28:34	SB
30	Dastaho Swonek	ISR	24.7.76	2:28:36	
31	Daniele Caimmi	ITA	17.12.72	2:29:18	
32	Anton Kosmač	SLO	.76	2:29:56	
33	Toni Bernadó	AND	9.12.66	2:30:52	
34	Brihon Voba	ISR	1.1.82	2:31:47	
35	Primož Kobe	SLO	23.5.81	2:31:47	
36	Kristoffer Üsterlund	SWE	15.9.72	2:32:16	
37	Ronald Schröer	NED	28.9.84	2:33:18	
38	Zohar Zemiro	ISR	1.1.77	2:36:58	
39	Marcel Tschopp	LIE	28.4.74	2:37:14	SB
40	Robert Kotnik	SLO	.75	2:40:57	
41	Javier Díaz	ESP	17.4.76	2:42:41	
42	José Moreira	POR	5.5.80	2:43:56	
43	Iván Ramírez	AND	30.9.77	2:51:42	PB
44	Christian Pflügl	AUT	24.12.78	2:53:15	SB
45	Alan Manchado	AND	21.5.75	3:12:40	PB
	Jordi Royo	AND	23.4.76	DNF	
	Florian Prüller	AUT	10.9.83	DNF	
	Tilahun Aliyev	AZE	21.3.90	DNF	
	Ignacio Cáceres	ESP	18.6.76	DNF	
	José Rios	ESP	15.3.74	DNF	
	James Theuri	FRA	30.11.78	DNF	
	Andi Jones	GBR	10.10.78	DNF	
	Martin Beckmann	GER	15.7.77	DNF	
	Tobias Sauter	GER	17.10.83	DNF	
	Denis Curzi	ITA	14.5.75	DNF	
	Stefano Baldini	ITA	25.5.71	DNF	
	Øystein Sylta	NOR	3.3.78	DNF	
	Adam Draczyński	POL	3.1.76	DNF	
	Henryk Szost	POL	20.1.82	DNF	
	Fernando Silva	POR	1.3.80	DNF	
	Hermano Ferreira	POR	16.11.82	DNF	
	Yuriy Abramov	RUS	9.12.76	DNF	
	Adil Bouafif	SWE	31.12.78	DNF	
	Oleksandr Sitkovskyy	UKR	9.6.78	DNF	