

Modelo de AEMET. Predicción del índice WBGT

Juan Andrés García Valero

Cargo: Jefe Unidad Funcional E+D.



ESTRÉS TÉRMICO Y RADIACIÓN UV:

Retos y soluciones ante el cambio climático en el ámbito laboral

Madrid 13 de mayo



2026 AÑO
DE LA SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO



Índice

- **El índice de estrés térmico WBGT**
- **Predicción del índice. Proyecto PRICAL**
- **Verificación de sus predicciones**
- **Próximas actividades**

El índice de estérms térmico WBGT

Utilidad. WBGT

- Indicador en el que se basa la norma UNE-EN ISO 7243:2017 para evaluar el estrés térmico en ambientes laborales.
- La normativa ISO establece pautas de medida del índice, cómo interpretarlo y límites de exposición.
- Integra humedad, radiación y temperatura

$$WBGT = 0.7 \cdot T_{bh} + 0.2 \cdot T_g + 0.1 \cdot T_{bs}$$

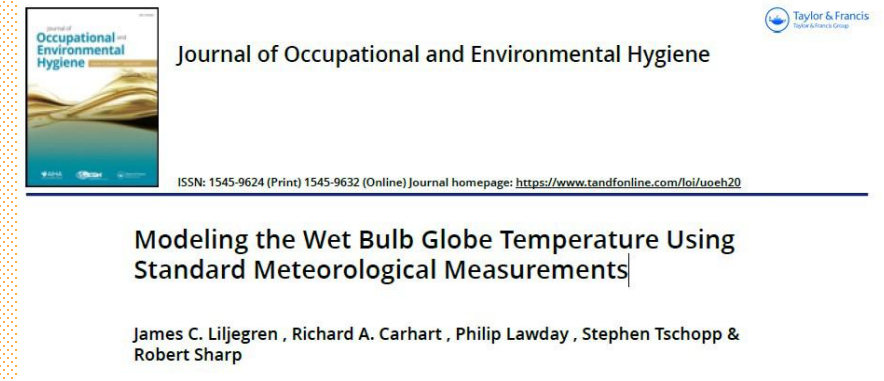


Principios físicos para el cálculo del WBGT

- Para su cálculo, en el caso que no se disponga de sensor de medida directa, es necesario acudir a observaciones de temperatura, radiación, viento y humedad.
- A su cálculo se llega a través de ecuaciones de balance de energía (T_g) y, de energía y masa (T_w) (Liljegren et al., 2008)

$$T_w = T_a - \frac{k_x \Delta H M_{H2O}}{h} \left(\frac{e_w - e_a}{P - e_w} \right) + \frac{\Delta F_{net}}{A h}.$$

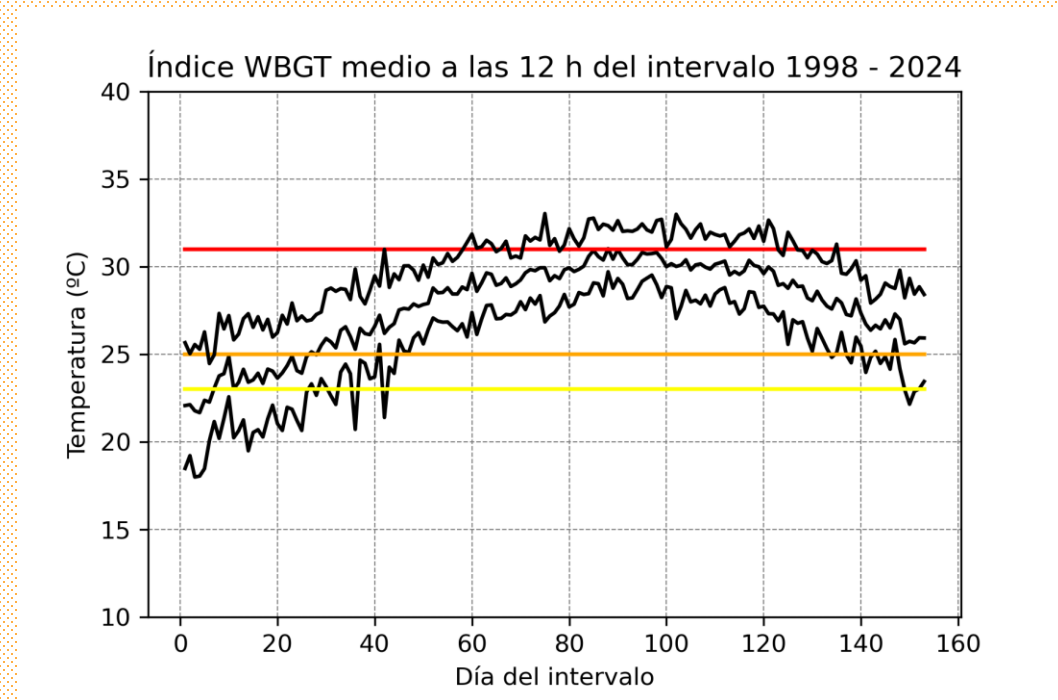
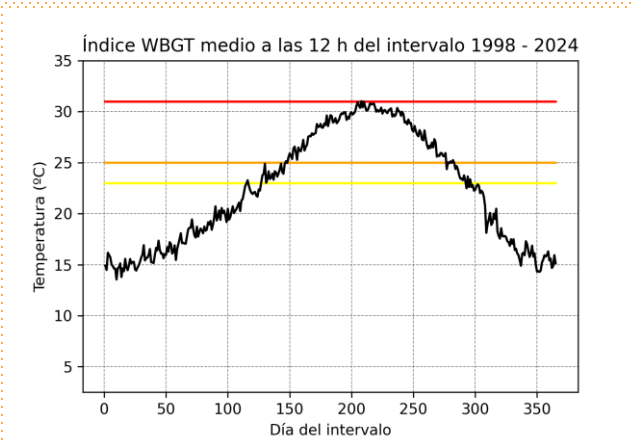
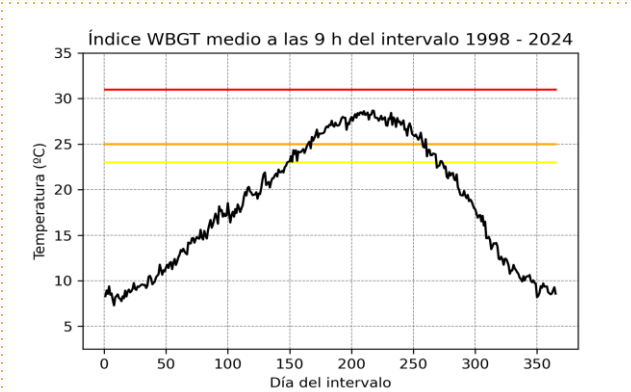
$$\begin{aligned} \frac{\Delta F_{net}}{A} = & \sigma \varepsilon_w \left[\frac{1}{2} (1 + \varepsilon_a) T_a^4 - T_w^4 \right] \\ & + (1 - \alpha_w) S \left[(1 - f_{dir}) \left(1 + \frac{D}{4L} \right) \right. \\ & \left. + f_{dir} \left(\frac{\tan(\theta)}{\pi} + \frac{D}{4L} \right) + \alpha_{sfc} \right]. \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} T_g^4 = & \frac{1}{2} (1 + \varepsilon_a) T_a^4 - \frac{h}{\varepsilon_g \sigma} (T_g - T_a) \\ & + \frac{S}{2\varepsilon_g \sigma} (1 - \alpha_g) \left[1 + \left(\frac{1}{2 \cos(\theta)} - 1 \right) f_{dir} + \alpha_{sfc} \right] \end{aligned}$$

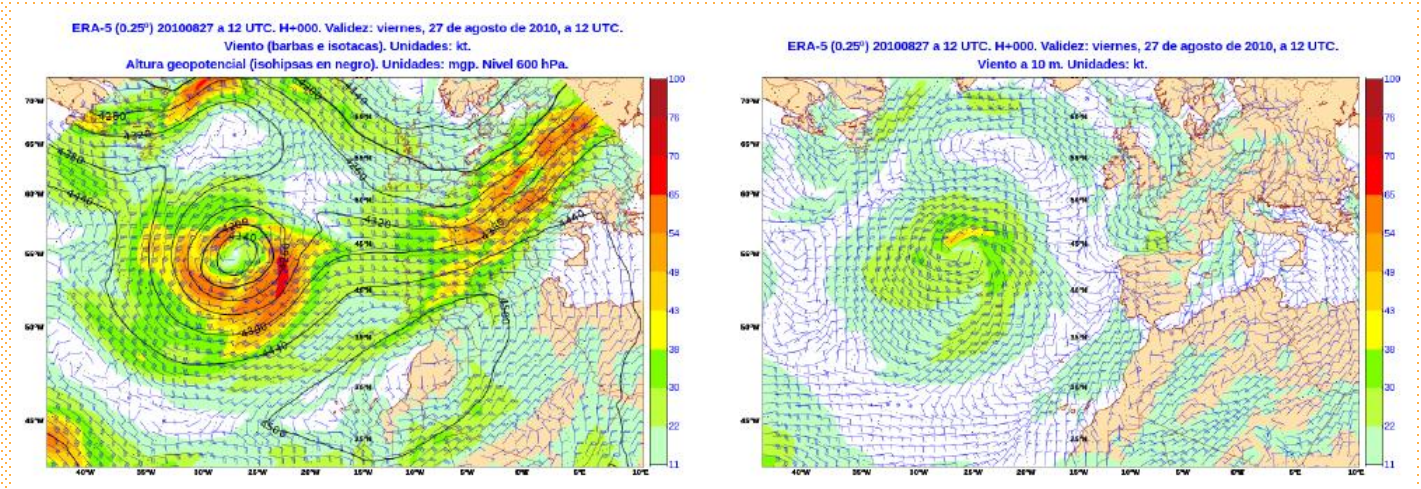
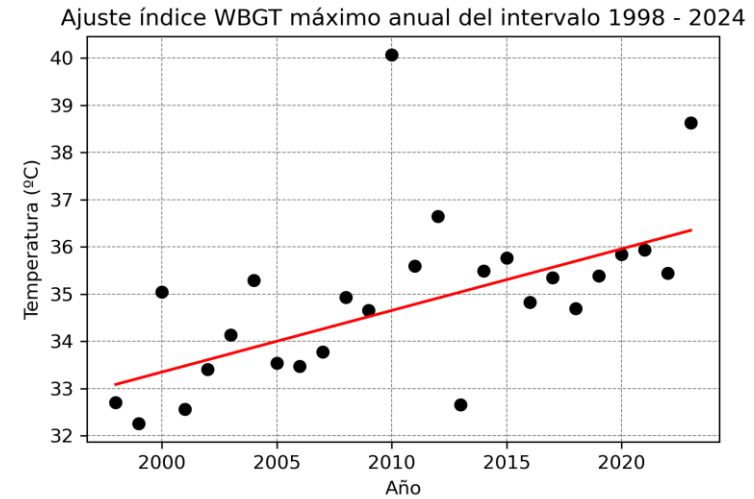
Climatología. WBGT. Murcia

- A partir de observaciones de temperatura, radiación, viento y humedad, en el observatorio de AEMET en Murcia (1998-2024)



Climatología. WBGT. Murcia

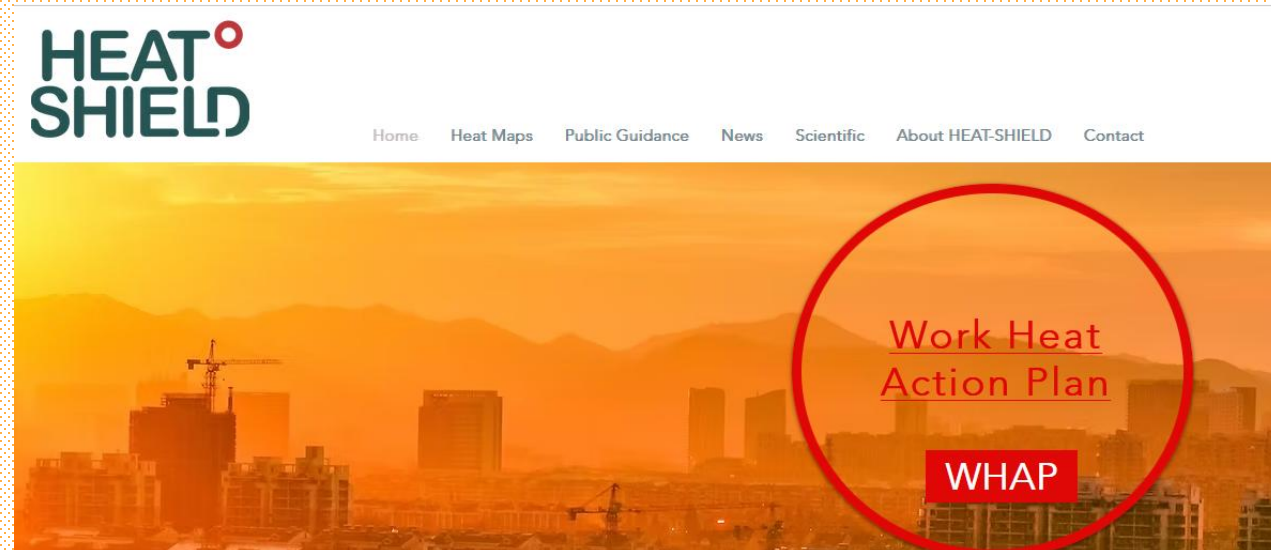
- Hay una tendencia muy clara del máximo anual del WBGT en este período de tiempo (1998-2024).
- Estos estudios permiten también caracterizar las situaciones atmosféricas asociadas a los episodios más extremos



Predicción del índice WBGT. Proyecto PRICAL

Antecedentes

- Proyecto [Heat-Shield](#) en el que participaron un consorcio de 12 instituciones europeas.
- **Misión:** Abordar los impactos negativos del estrés térmico en el lugar de trabajo sobre la salud y la productividad de los trabajadores en sectores estratégicos europeos (manufactura, construcción, transporte, turismo y agricultura), así como el posible aumento de estos impactos a medida que avance el cambio climático.



Antecedentes

- Entre los objetivos de Heat-Shield estaba la elaboración de **predicciones probabilísticas del riesgo térmico**, considerando para ello el índice wbgt y otros aspectos como tasa metabólica y vestimenta.
 - Predicción del **riesgo máximo diario** (corto plazo (5 días) y largo plazo (6 a 46 días)).
 - Predicción **riesgo máximo de la semana** hasta 4 semanas.

Forecast

WEEK 1 WEEK 2 WEEK 3 WEEK 4

Probability of the maximum heat stress condition forecasted during the week
Forecast for Mon 1.07 - Sun 7.07.2019, issued on 24.06.2019

Risk of hot* days

100 %
75 %
50 %
25 %
0 %

HEAT SHIELD

Heat stress depends on the weather as well as your individual physiology and working conditions

Weather → Work Rate
Clothing → The Individual

Use the advanced Heat-Shield alert system and get scenario specific and personalized forecasts, advice on hydration, how to minimize heat load, solutions for specific industries...

READ MORE

Personalized heat alerts and rest /hydration advice

USE WEB VERSION

HEAT SHIELD

Forecast • Profile • Feedback

Forecast • Dashboard U.C.

Long term heat stress risk

Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun
05-27-2019	05-28-2019	05-29-2019	05-30-2019	05-31-2019	06-01-2019	06-02-2019
05-05-2019	05-04-2019	05-05-2019	05-06-2019	05-07-2019	05-08-2019	05-09-2019
05-10-2019	05-11-2019	05-12-2019	05-13-2019	05-14-2019	05-15-2019	05-16-2019
05-17-2019	05-18-2019	05-19-2019	05-20-2019	05-21-2019	05-22-2019	05-23-2019
05-24-2019	05-25-2019	05-26-2019	05-27-2019	05-28-2019	05-29-2019	05-30-2019
07-01-2019	07-02-2019					

HEAT SHIELD

Forecast • Profile • Feedback

Forecast • Dashboard U.C.

Short term heat stress risk

Wednesday, Thursday, Friday, Saturday, Sunday

HEAT STRESS RISK LEVELS

HEAT STRESS RISK LEVELS

- HEAT STRESS RISK LEVELS
- HEAT STRESS RISK LEVELS
- HEAT STRESS RISK LEVELS
- HEAT STRESS RISK LEVELS

Hydration:

- drink about half a liter of water per hour
- drink about a liter per hour
- drink more than a liter of water per hour

Work breaks:

- no further breaks are needed
- small breaks
- increase the number of breaks with cooling
- frequent breaks in shadow or cooled area

LONG TERM RISK
EDIT PROFILE

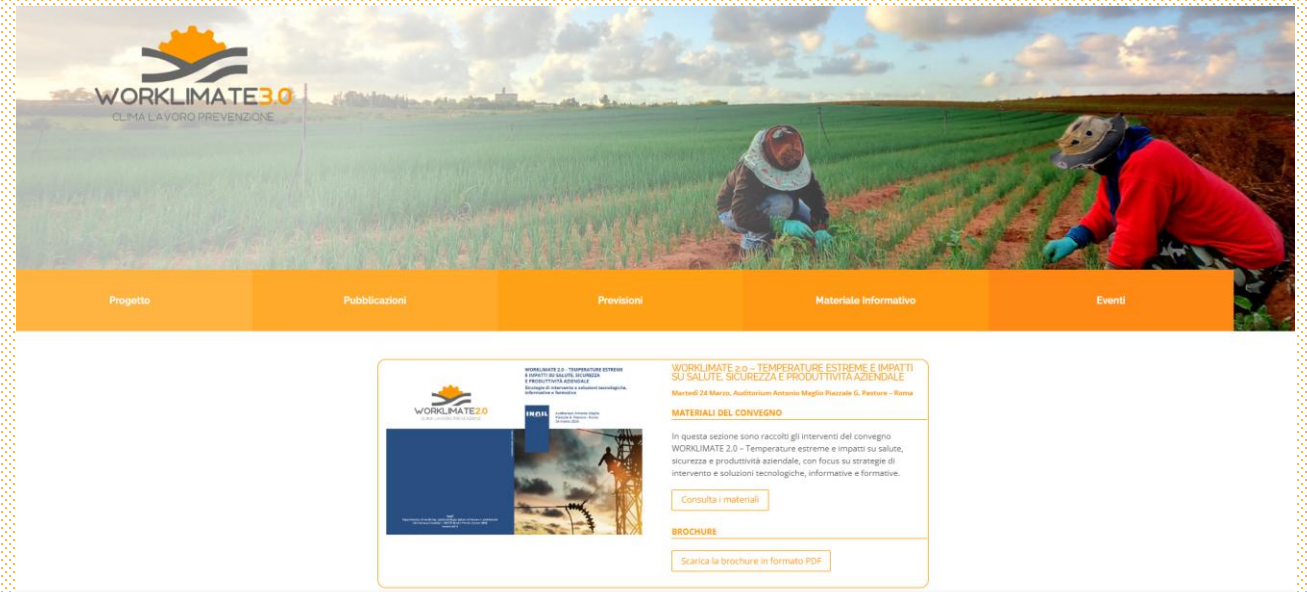
Antecedentes

Proyecto workClimate

Objetivo:

Desarrollo de un sistema integrado de alerta sanitaria por calor, de carácter meteorológico-climático y epidemiológico, específico para el ámbito laboral.

Para ello se ha desarrollado una **plataforma y aplicación web** que proporciona **previsiones personalizadas** basadas en las **características individuales de los trabajadores y en las del entorno laboral**.



Antecedentes

- Proyecto workClimate**
 Actualmente en marcha (modo experimental)
 niveles de riesgo en función de la
 Mayor o menor actividad física y modelo
 meteorológico Moloch

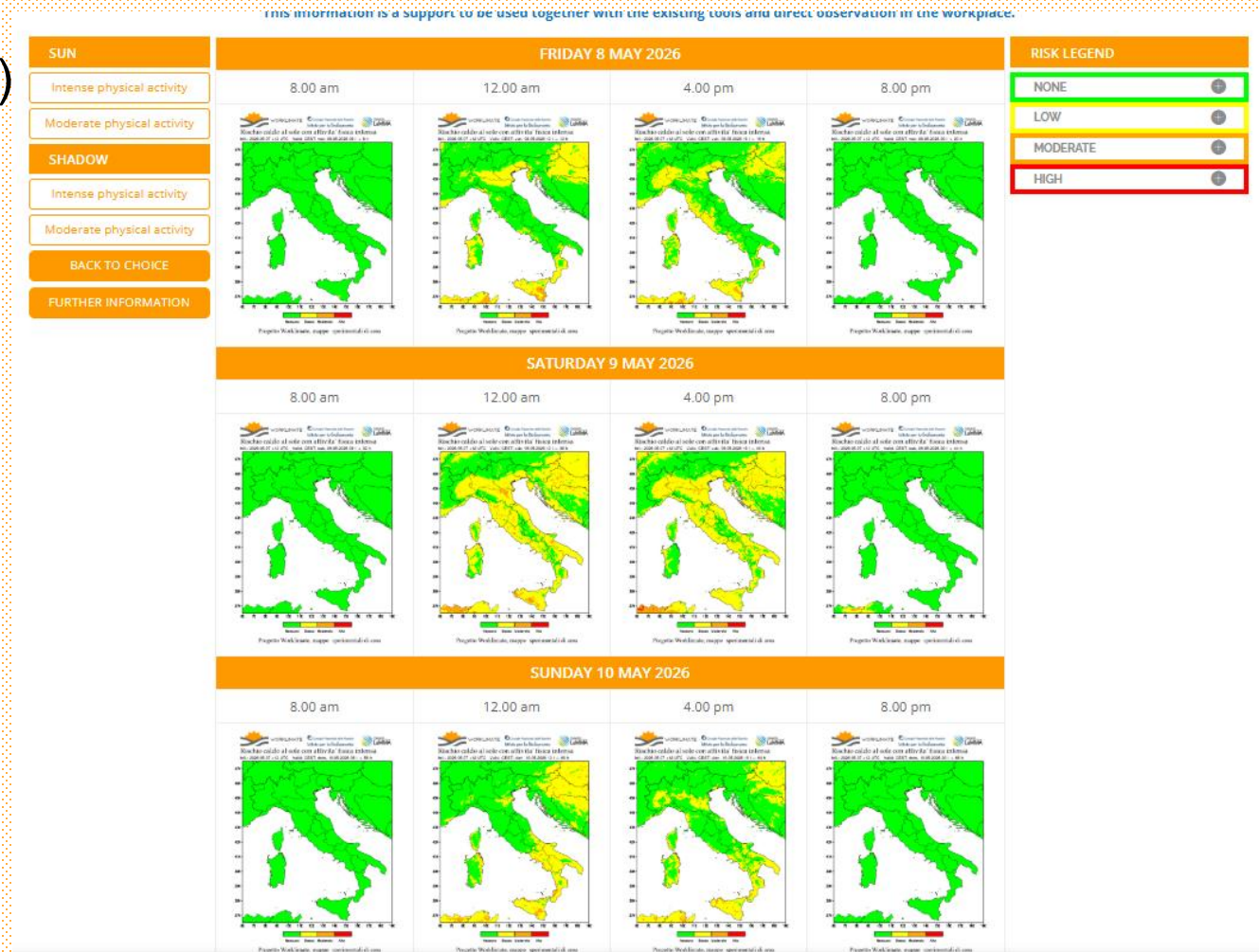


Experimental activity for use by workers, employers occupational safety and management professionals.

Heat risk forecast maps for workers exposed to different occupational scenarios

Heat risk forecasts based on the "anti-heat" ordinance in force in some Italian regions

Forecasts of the areas where exceeding the daily temperature threshold of 35°C is possible

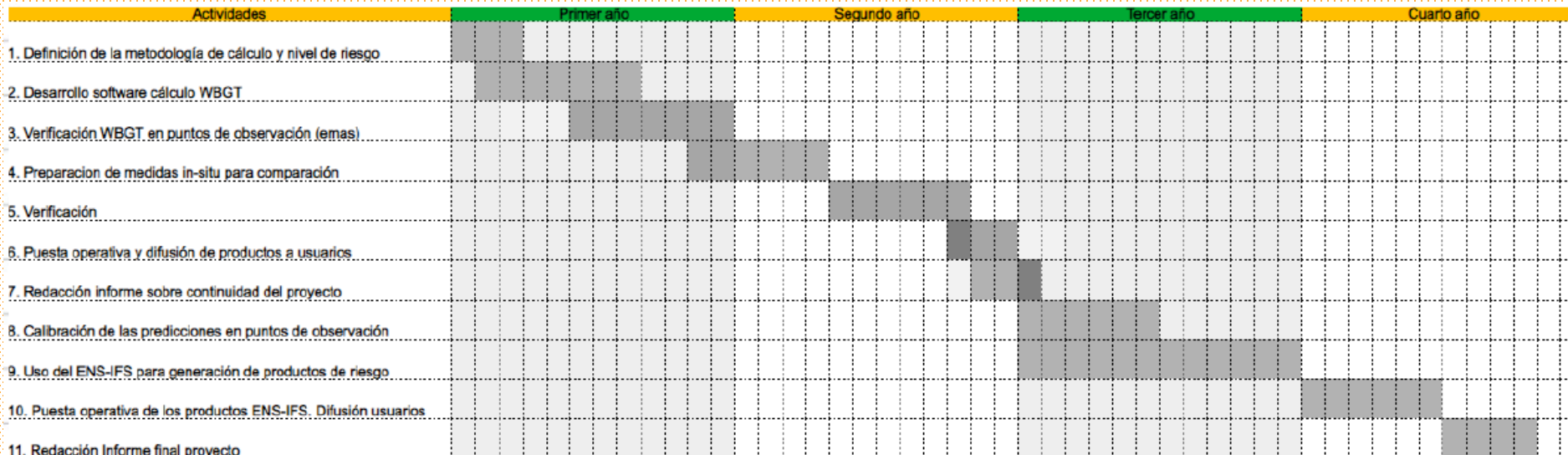


Predicciones-WBGT. PRICAL

- **Dentro del protocolo de colaboración INSST-AEMET, en febrero de 2024 comenzamos proyecto PRICAL (Prevención del Riesgo por Calor para la Actividad Laboral)**



- **El objetivo de AEMET en este proyecto es proporcionar predicciones del índice WBGT sobre territorio español basado en modelos meteorológicos.**



Predicciones-WBGT. HARMONIE-AROME

- Las predicciones las estamos generando con las salidas horarias del modelo [HARMONIE-AROME](#)

ECUACIONES ATMOSFÉRICAS

Conservación de la energía :

$$\frac{dT}{dt} = (\nabla \cdot \mathbf{k}_h \nabla) T + \frac{1}{c_p} \sum \frac{dQ}{dt}$$

Conservación del momento:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \vec{k} \times \vec{V} - \nabla \Phi - \vec{F}$$

Conservación de la masa :

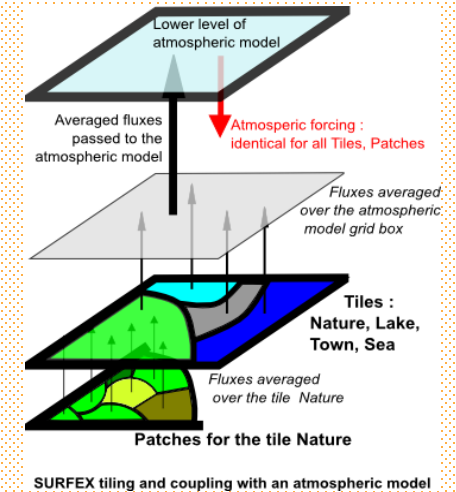
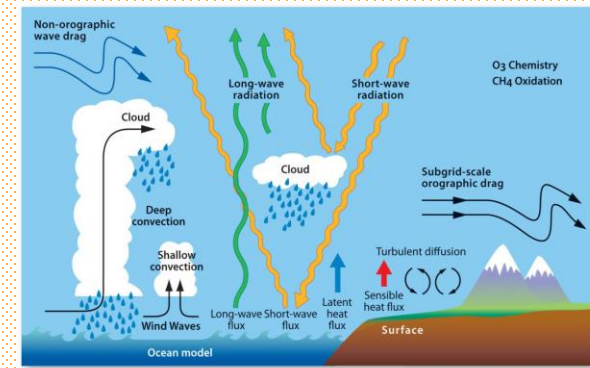
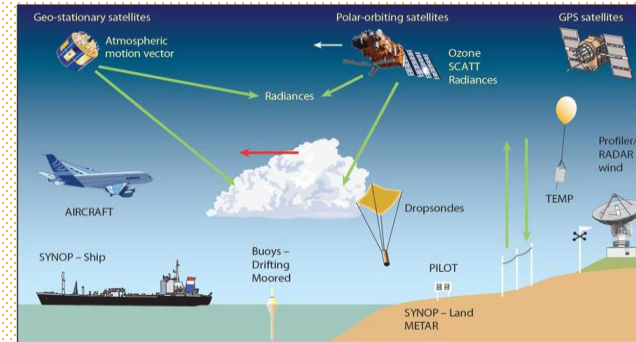
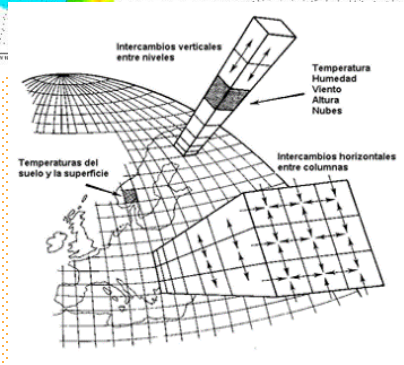
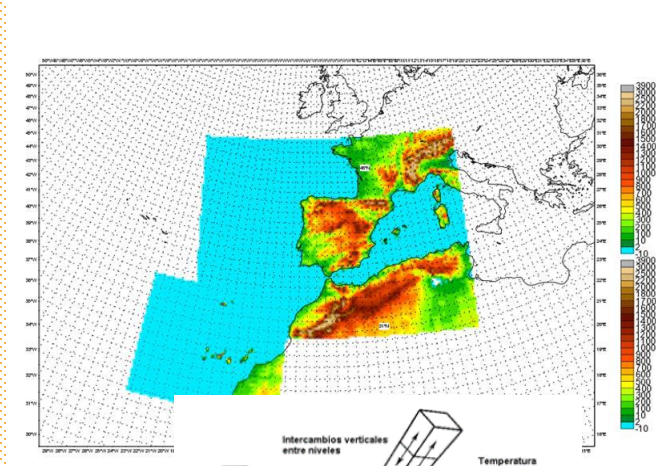
$$\nabla(\rho \cdot \vec{V}) = 0$$

Conservación del agua :

$$\frac{d(\rho q_i)}{dt} = (\nabla \cdot \mathbf{k}_h \nabla)(\rho q_i) + E - P$$

Ecuación de estado :

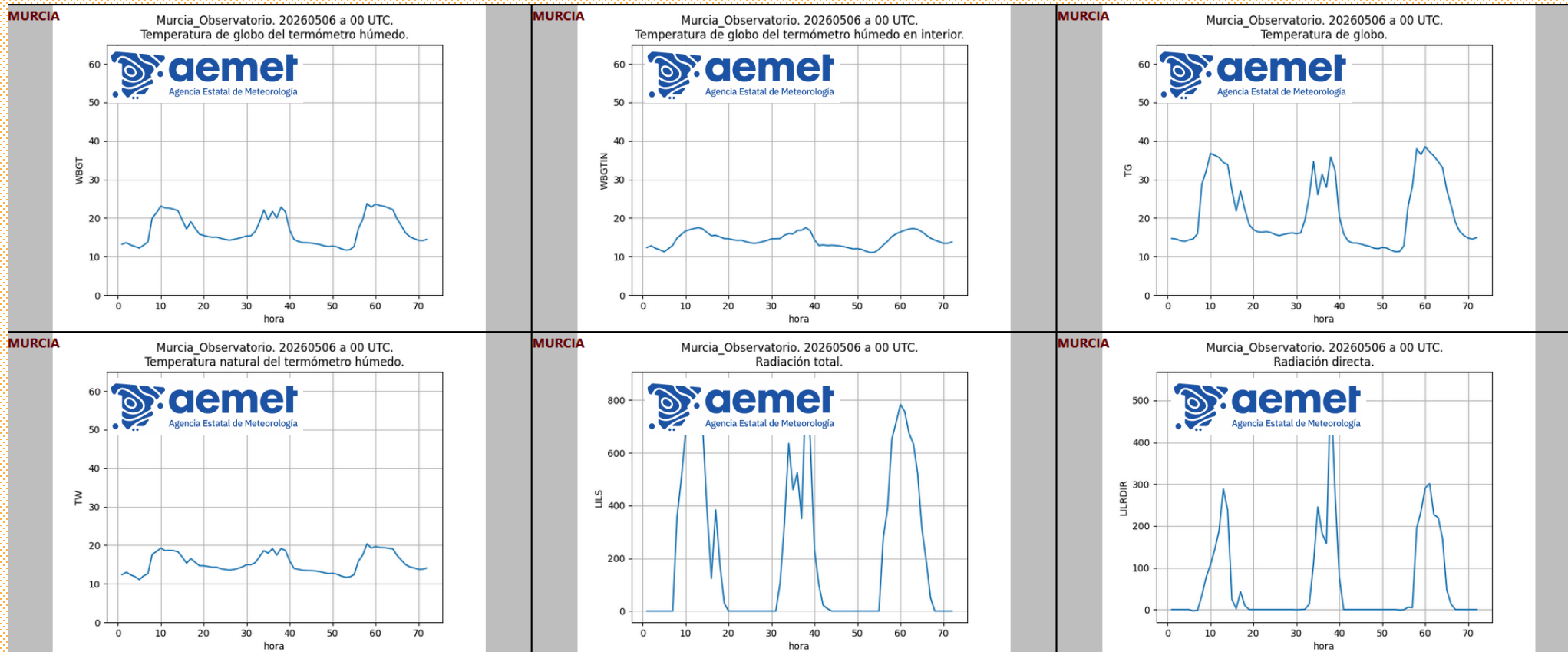
$$p = \rho R_d T (1 + 0.61 q_v)$$



- Características del modelo:** resolución horizontal: 2.5 x 2.5 km, 65 niveles verticales (último a 10 hPa), No hidrostático (convección no parametrizada), esquema superficie: surfex, asimilación variacional 3-D (convencionales, radar, satélites polares y geoestac.). Alcances horarios de la predicción hasta H+72

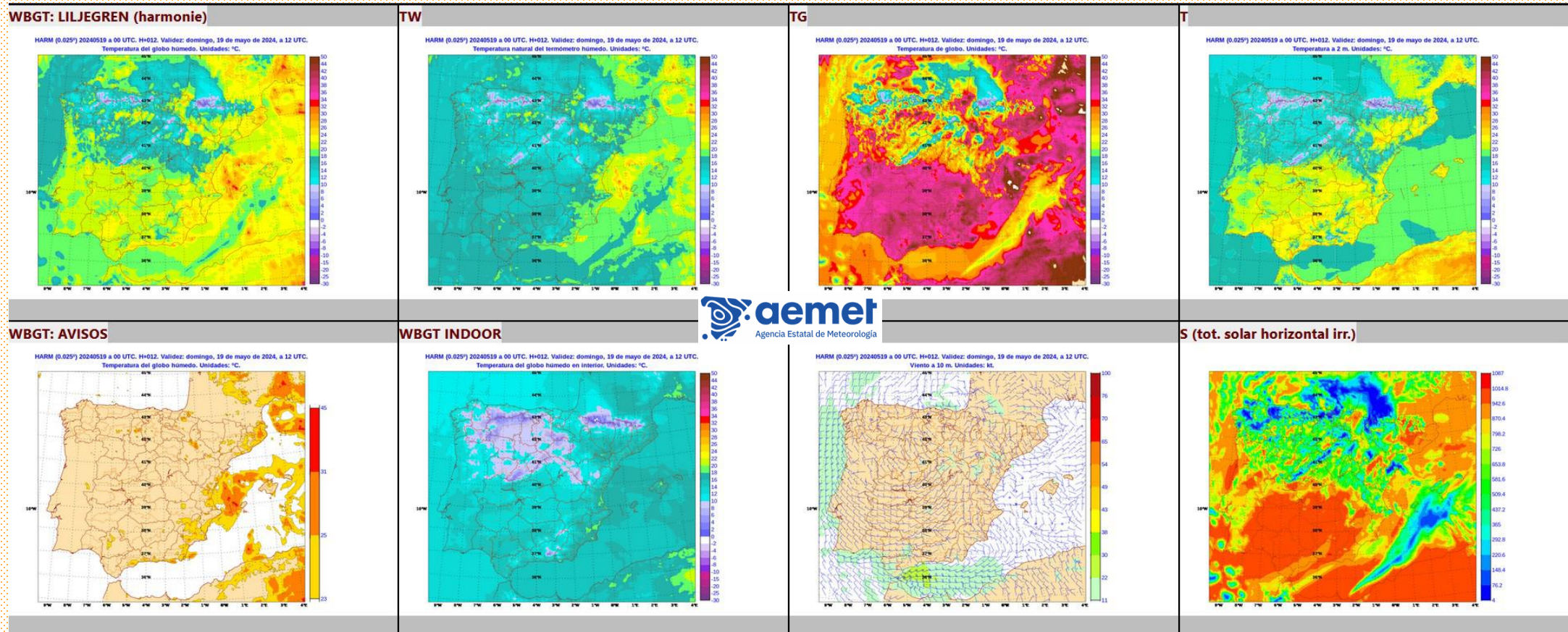
Predicciones-WBGT. HARMONIE-AROME

- Ejemplos de salidas horarias (hasta H+72h) del índice WBGT y relacionadas para la ciudad de Murcia:



Predicciones-WBGT. HARMONIE-AROME

- Ejemplos de salidas de variables WBGT y relacionadas:



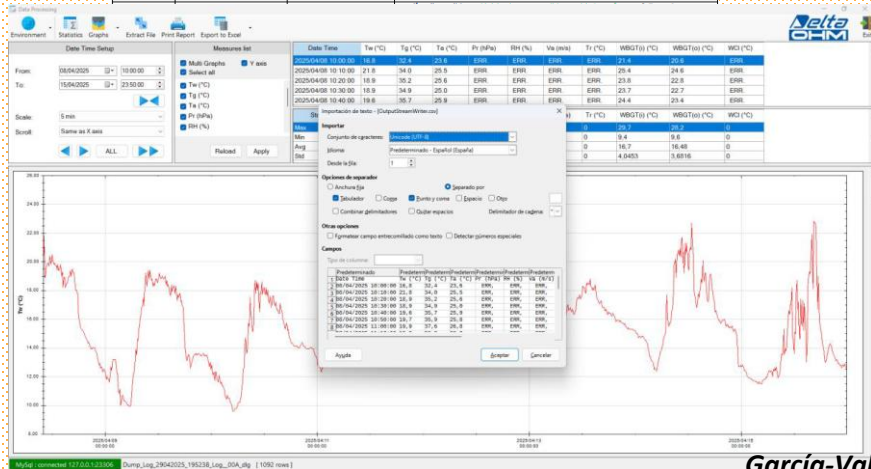
Verificación de las predicciones

Campaña de observación. Murcia

- Primeras medidas directas WBGT. Verano de 2024: Murcia (AEMET) y Barakaldo (INSST)



Obser	Inicio	Fin	comentarios
1	2024-08-02 08:00	2024-08-05 07:00	3 días disponibles
2	2024-08-05 08:00	2024-08-07 07:00	2 días disponibles. Tras la finalización no se programan medidas para el día siguiente. Falta personal. Se juntan los ficheros de esta medición con los de la anterior
3	2024-08-08 08:00	2024-08-13 07:00	5 días disponibles. Se cambia a una plataforma anclada en el suelo, eliminando el epíodo
4	2024-08-13 08:00	2024-08-14 11:30	1 día disponible. Se corta a las 11:30 del día 14 (pero se graban los datos), sin saber por qué. No me doy cuenta del corte hasta el día 18 (domingo, cuando había programado que finalizase a las 07:10)
5	2024-08-18 08:00	2024-08-23 23:50	5 días disponibles. Se programa con éxito esta semana que me encontraba de vacaciones.
6	2024-08-27 08:00	2024-08-29 23:50	2 días disponibles. Reigo el cambio de pila a las renovables que me pasaran del NDT.
7	2024-08-30 08:00	2024-08-31 23:50	2 días disponibles
8	2024-09-02 08:00	2024-09-03 07:00	1 día disponible. Estaba programado hasta el 6 de septiembre pero se corta la grabación el día 3 a las 07:00
9	2024-09-09 06:00	2024-09-14 23:50	6 días disponibles. Bien la grabación, no falla nada
10*	2024-09-16 06:00	2024-09-21 23:50	Se corta la grabación y no pueden descargarse los pocos datos grabados. Falta descarga desde UGD al PC
11*	2024-09-20 06:00	2024-09-23 23:50	Se graba bien no pueden descargarse los datos grabados. Falta descarga desde UGD al PC
12*	2024-09-24 06:00	2024-09-29 23:50	Se graba bien no pueden descargarse los datos grabados. Falta descarga desde UGD al PC
13*	2024-09-30 08:00	2024-10-06 23:50	Se graba bien no pueden descargarse los datos grabados. Falta descarga desde UGD al PC
14*	2024-10-07 08:00	2024-10-09 23:50	Se corta la grabación y no pueden descargarse los pocos datos grabados. Falta descarga desde UGD al PC
15*	2024-10-10 10:10	2024-10-12 23:50	Se graba bien no pueden descargarse los datos grabados. Falta descarga desde UGD al PC
16	2024-10-15 11:00	2024-10-17 23:50	2,5 días y medio disponibles. Funciona ya bien el registro y la descarga
17	2024-10-18 12:00	2024-10-21 23:50	2h y 15' de grabación. Se corta la grabación a las 14:15 del mismo día que se puso, por lo que solo hay 2h y 15' de grabación. Fue viernes y lo dejé de pruebas el finde (no había observado), sábado, el lunes verifico que estaba midiendo (log encendido) sin embargo dejó de grabar días antes, no entiendo los motivos, aunque es posible que el equipo detectara batería baja, aunque el martes, cuando recupero el equipo aún disponía de batería.
18	2024-10-22 08:00	2024-10-25 23:50	4 días disponibles. Al inicio de esta medida cambio baterías. No falla nada



Campaña de observación: verano 2025

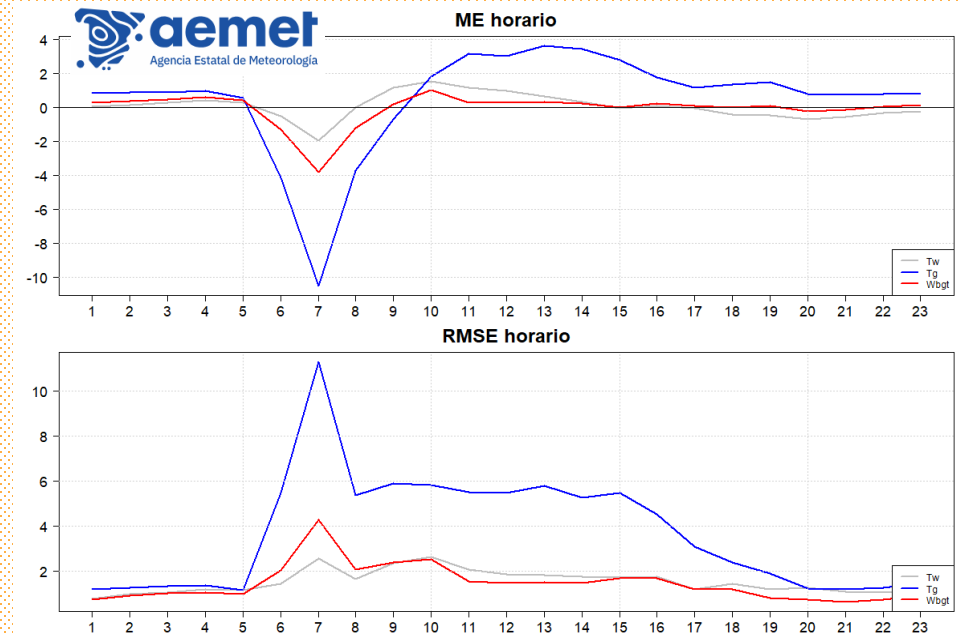
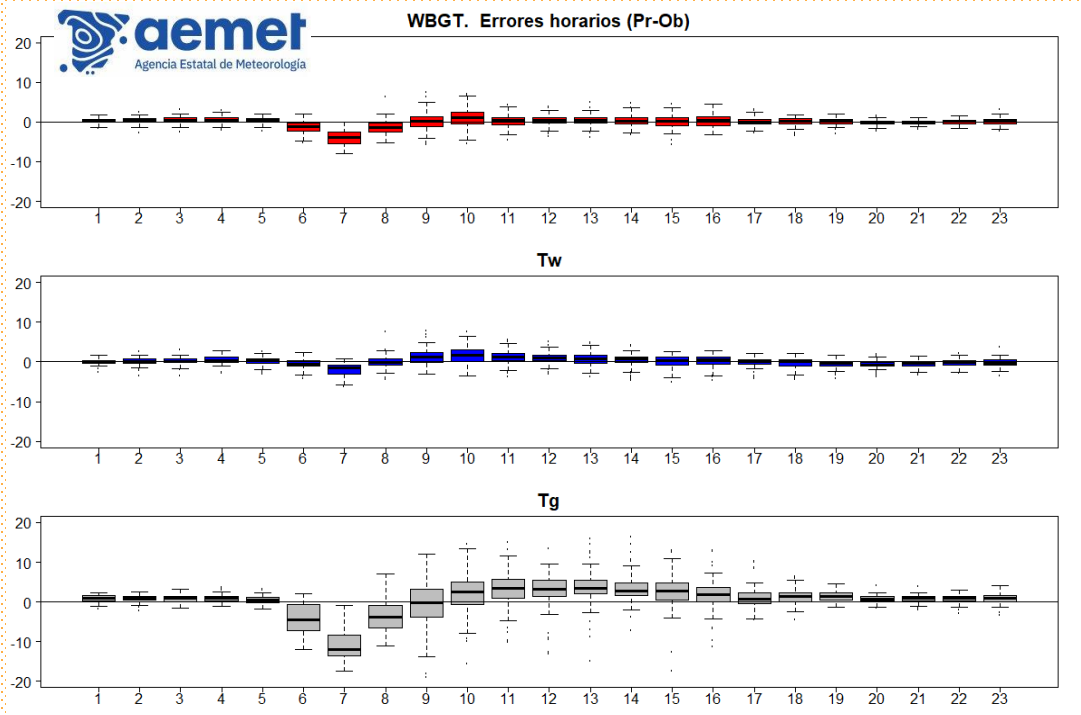
- En el **verano de 2025** (jun-sep/oct). Se amplió la red de observación a nuevos puntos.
- **Problemática:** ubicaciones, en algunos casos, no idóneas para evaluar el modelo; equipos distintos

Red observacional	
ANDALUCIA	Córdoba / Granada
ASTURIAS	Oviedo
BALEARES	Palma
CANARIAS	Las Palmas de Gran Canaria Santa Cruz de Tenerife
CASTILLA Y LEÓN	Segovia
COMUNIDAD VALENCIANA	Castellón de la Plana
EXTREMADURA	Badajoz / Cáceres
LA RIOJA	Logroño
MADRID	Madrid
MURCIA	El Palmar
CNCT	Barcelona
CNVM	Barakaldo



Verificación de las predicciones en Murcia

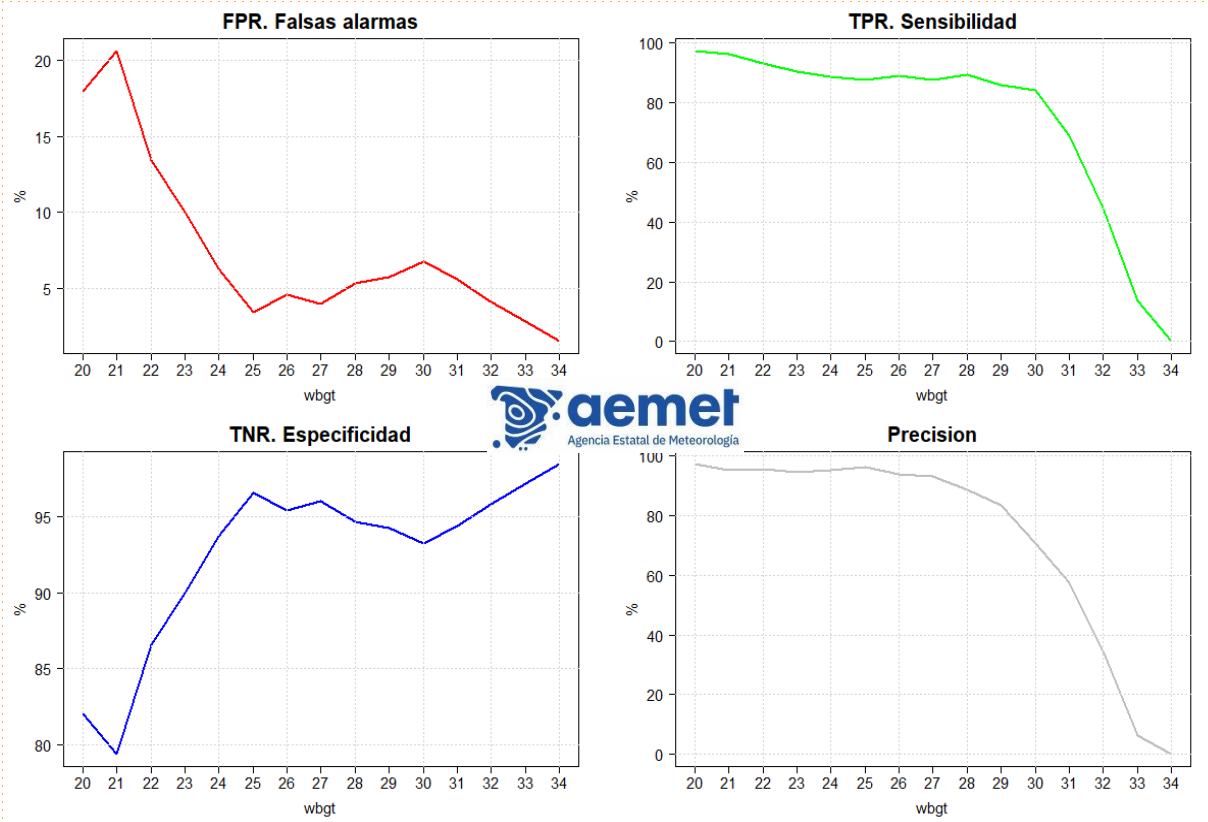
- Verificación en Murcia (AEMET, verano 2025).



- **EM (en °C):** WBGT (-0.07), Tw (0.10), Tg (0.68)
- **ECM (en °C):** WBGT (1.69), Tw (1.65), Tg (4.69)

Verificación de las predicciones. Murcia

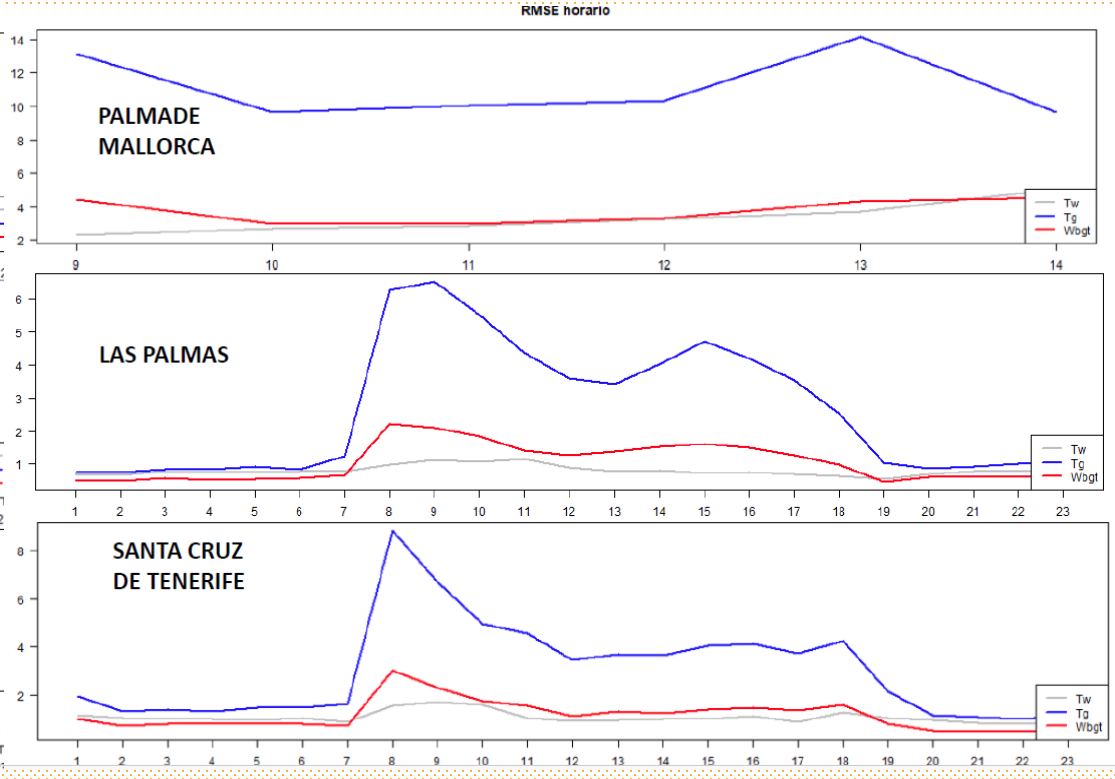
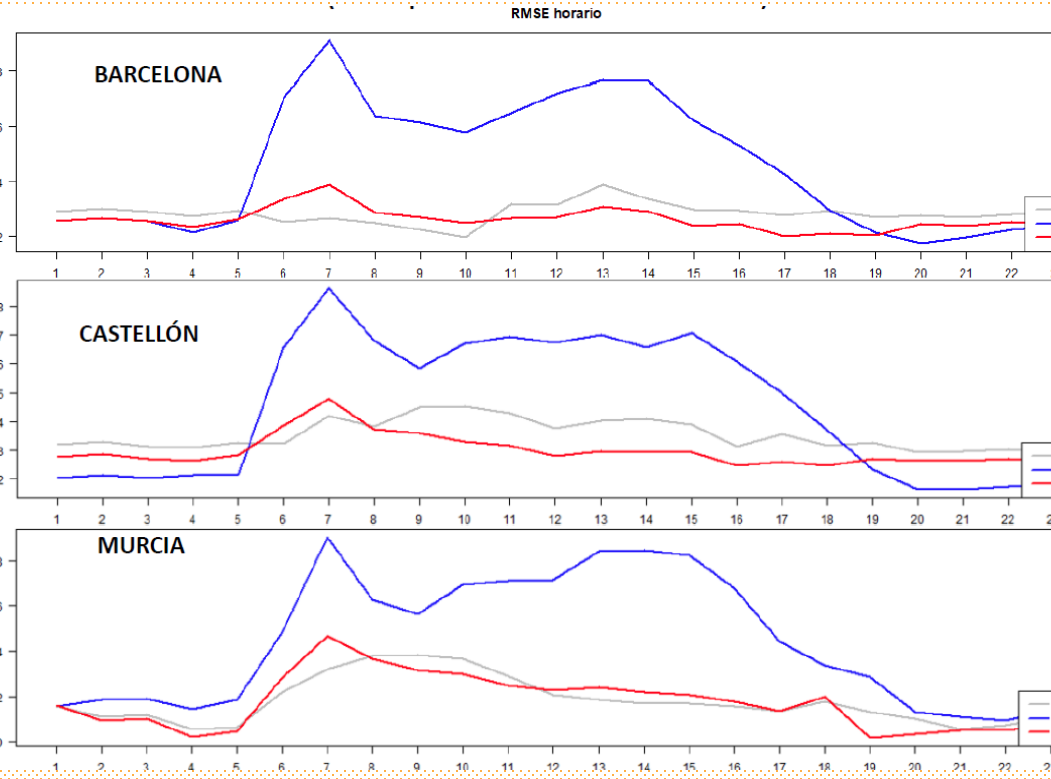
- Verificación en Murcia (AEMET, verano 2025).



- **Baja sensibilidad del modelo** para WBGT observados > 32 °C (aprox. 40%).
- **Baja precisión.** El error crece para los valores más altos observados del WBGT (precisión < 40% wbgt observado > 32 °C).
- El modelo en general subestima considerablemente para wbgt observados > 33-34 °C ((errores medios aprox. 3 °C)
- Los errores más altos se producen **entre las 6 y las 8 UTC**. A las 7 UTC se observa una **subestimación** muy importante fuertemente influido este error por la variable Tg.
- **Entre las 9 y las 10 UTC** el modelo ha presentado los **mayores errores de sobrepredicción** (en ocasiones, se ha predicho un valor de wbgt del orden de 39 °C!!). Afectando en gran medida por el valor de Tw (¿calmas viento en el modelo?)
- El **error medio** del wbgt en las horas **entre las 11 UTC y el resto del día es bajo**, y el sesgo es prácticamente nulo, observándose un **rmse inferior a 2 °C**.

Verificación de las observaciones. Otros puntos

RMSE (WBGt)	
OVIEDO	3,75
BARAKALDO	2,05
LOGROÑO	2,98
BARCELONA	2,66
CASTELLÓN	3,03
MURCIA	2,78
PALMA DE MALLORCA	3,58
LAS PALMAS	1,18
SANTA CRUZ TENERIFE	1,32



Próximas actividades

Actividades a lo largo de este año

- **Proporcionar predicciones diarias hasta H+72 al INSST de las salidas numéricas del modelo para todo el territorio nacional en un marco de desarrollo operativo.**
- **Nueva campaña de observación este verano (INSST-AEMET).**
- **Prueba piloto acerca de la utilidad de las predicciones para su uso por usuarios externos (INSST).**
- **Seguimiento de una nueva versión de las salidas del modelo numérico para evitar los efectos divergentes que provocan las calmas de viento simuladas por el modelo de predicción (AEMET).**
- **Continuar con el análisis de la verificación para posibles mejoras en la simulación del WBGT (T_g y T_w) (INSST-AEMET)**

Muchas GRACIAS



Bibliografía

- **Grifoni, D.**, Messeri, A., Crisci, A., Bonafede, M., Pasi, F., Gozzini, B., ... & WORKCLIMATE Collaborative Group. (2021). Performances of limited area models for the WORKCLIMATE heat–health warning system to protect worker’s health and productivity in Italy. *International journal of environmental research and public health*, 18(18), 9940.
- **Morabito, M.**, Messeri, A., Noti, P., Casanueva, A., Crisci, A., Kotlarski, S., ... & Nybo, L. (2019). An occupational heat–health warning system for Europe: the HEAT-SHIELD platform. *International journal of environmental research and public health*, 16(16), 2890.
- **Standard, I. O.** (2017). Ergonomics of the thermal environment-Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index-ISO 7243: 2017. *International Standards Organisation Geneva Switzerland*
- **Liljegren, J. C.**, Carhart, R. A., Lawday, P., Tschopp, S., & Sharp, R. (2008). Modeling the wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 5(10), 645-655.