

# Modelización de la formación de rocío en superficies

Maestre Valero, J.F., Martínez Alvarez, V.

Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica

Dpto. de Ing. de los Alimentos y del Equipamiento. Agrícola, Área Agroforestal

Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968 32 7052, Fax: 968 32 7031

E-mail: Josef.maestre@upct.es

**Resumen.** Este estudio presenta un balance de energía a escala nocturna para simular la formación de condensación y la temperatura superficial de un condensador radiativo pasivo. El modelo requiere como parámetros de entrada, la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento, la radiación atmosférica y la emisividad del film. Los resultados del modelo se validaron con datos experimentales de producción de condensación y de temperatura de superficie. Este modelo puede ayudar a agencias del agua a estimar la producción de condensación que podría ser recogida desde la atmósfera para ser usada como recurso adicional en regiones hídricamente estresadas.

## 1. Introducción

La formación de rocío se define como un fenómeno atmosférico nocturno, frecuente y natural en el que el aire húmedo se condensa sobre una superficie dando lugar a agua en estado líquido. Aunque existe una gran variedad de técnicas dirigidas a su cuantificación (Beysens et al., 2005; Maestre-Valero et al., 2011), su simulación mediante modelos numéricos es escasa. Bajo nuestro punto de vista, los modelos más eficientes son aquellos basados en la aplicación del balance de energía sobre una superficie. Pedro y Gillespie (1982), Nilsson (1996) y Jacob et al. (2008) trataron de estimar la formación de condensación diaria mediante la aplicación de este tipo de modelos, aunque no obtuvieron estimaciones satisfactorias (dispersiones elevadas entre los registros y las estimaciones de condensación). Bajo nuestro punto de vista, el flujo energético de condensación es pequeño cuando se compara con los demás flujos que intervienen en el balance de energía y por tanto es necesaria una determinación muy precisa tanto de los parámetros que componen el balance como de los periodos durante la noche donde el modelo se aplica para obtener resultados satisfactorios (ver materiales y métodos).

El objetivo de este estudio es el desarrollo y evaluación de un modelo basado en la aplicación de un balance de energía nocturno para estimar la formación de condensación diaria.

## 2. Materiales y métodos

Este estudio se realizó durante un año entre mayo – 2009 y mayo – 2010. El balance de energía se aplicó sobre un condensador radiativo pasivo (CRP). Este dispositivo consiste en una estructura plana (1 m<sup>2</sup> de superficie) instalada con una inclinación de 30° con respecto al suelo (Beysens et al., 2003). La estructura

sustenta un film de polietileno negro donde se forma la condensación cuando la temperatura del film es menor que la temperatura de rocío y las condiciones ambientales son favorables. Las gotas de agua formadas descienden por gravedad y se transportan mediante una canaleta hacia un depósito donde se cuantifica su producción.

El modelo se expresa como el balance entre ganancias y pérdidas de energía del siguiente modo:

$$R_n + \lambda C + H = 0 \quad (1)$$

donde  $R_n$  es la radiación neta,  $\lambda C$  es el calor latente de condensación y  $H$  es el calor sensible. Este modelo utiliza como variables de entrada la temperatura del aire ( $T_a$ ), la humedad relativa ( $HR$ ), velocidad del viento ( $U_{2m}$ ), radiación atmosférica ( $L_a$ ) y la emisividad del film ( $\varepsilon$ ). Estas cuatro variables se determinaron en una estación cercana al CRP.  $R_n$  se calcula como la diferencia entre el flujo  $L_a$  y la energía de onda larga emitida por el film ( $L_s$ ) determinada a partir de la ecuación de Stefan Boltzmann.

$$L_s = \sigma \varepsilon_s T_s^4 \quad (2)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzmann.  $\varepsilon_s$  se seleccionó de acuerdo a las medidas realizadas por Maestre-Valero et al. (2011).

Los resultados del modelo son la temperatura superficial del CRP ( $T_s$ ) y la condensación. Por tanto, con el fin de validar el modelo, se registró  $T_s$  y se utilizó una balanza de precisión que permitió determinar la producción de condensación cada noche. Los flujos  $H$  y  $\lambda C$  se calcularon a partir de las ecuaciones

$$H = h_c (T_f - T_a) \quad (3)$$

$$\lambda C = h_v (e_s - e_a) \quad (4)$$

donde  $e_s$  es la presión de vapor a saturación a la temperatura de superficie y  $e_a$  la presión de vapor actual del aire.  $h_v$ , considerada igual  $h_c/\gamma$ , es el coeficiente de transferencia de masa, siendo  $h_c$  el coeficiente de transferencia de calor y  $\gamma$  la constante psicométrica.  $h_c$  se determinó siguiendo las indicaciones de Richard (2009) para superficies cuando  $U_{2m} < 5 \text{ ms}^{-1}$ .

Como consecuencia de las elevadas dispersiones encontradas en estudios bibliográficos previos para estimar la formación de rocío en superficies, este estudio propone la aplicación de un filtro a los datos de entrada al modelo de modo que sólo se seleccionen los periodos cuando la humedad relativa es mayor de 80% (Maestre-Valero et al. 2011).

Una vez que los datos se filtraron, el modelo se corrió a una escala nocturna, entre las 20:00 y las 8:00, pero considerando únicamente los datos cuando la HR > 80%. El balance de energía se resolvió mediante una iteración numérica programada en Visual Basic e implementada en Excel que permitió estimar temperatura superficial media nocturna del condensador y por tanto cuantificar la formación de rocío a partir de la Eq. 4.

### 3. Resultados

#### 3.1. Componentes del balance de energía

Los valores medios nocturnos de  $R_n$ ,  $H$  y  $\lambda C$  fueron -39,3, 30,2 y 9,1  $\text{W m}^{-2}$ . La formación de condensación representó el 23,2% y el flujo de calor sensible representó un 76,8% de las pérdidas radiativas de energía. Las mayores producciones de rocío se observaron en octubre y fueron atribuidas a (i) elevada humedad atmosférica (valores medios de 92,4 %) y (ii) reducida velocidad del viento durante el periodo nocturno (valor medio de  $0,56 \text{ ms}^{-1}$ ).

#### 3.2. Simulación de la $T_s$

Los registros y las estimaciones de  $T_s$  mostraron una correlación elevada ( $R^2 = 99\%$ ; Fig. 1). El RMSE fue  $0,61 \text{ }^\circ\text{C}$  y el MBE fue  $-0,17 \text{ }^\circ\text{C}$ . Estos parámetros estadísticos manifiestan el buen funcionamiento del modelo y una ligera tendencia del modelo a subestimar  $T_s$ . La evolución mensual también presentó estimaciones muy precisas de la temperatura de superficie.

#### 3.3. Simulación de rocío

Las producciones de condensación y las estimaciones mostraron una relativamente buena correlación ( $R^2 = 71\%$ ; Fig. 2). En este caso, el RMSE fue  $0,053 \text{ mm}$  y el MBE fue  $0,016 \text{ mm}$  lo cual indicó que el modelo sobreestimó ligeramente la condensación.

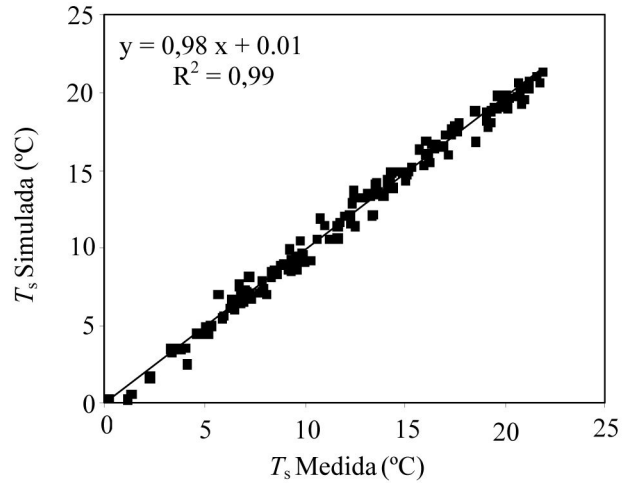


Figura 1. Análisis de regresión entre la temperatura superficial nocturna medida y la simulada durante el periodo experimental.

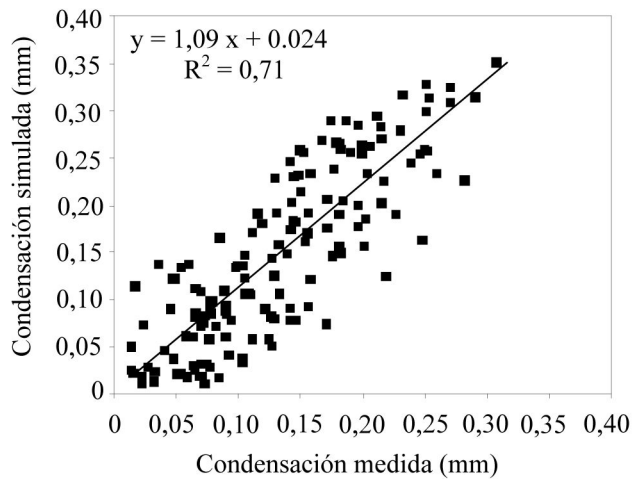


Figura 2. Análisis de regresión entre la formación de condensación nocturna medida y la simulada durante el periodo experimental.

Con el fin de mejorar la correlación, se analizaron los residuos con otras variables climáticas indicando que los residuos fueron dependientes de la radiación atmosférica nocturna ( $L_a$ ). Sin embargo, aunque la correlación ( $R^2$ ) se mejoró ligeramente, el modelo subestimó la condensación, por tanto no fue considerado. Los análisis mensuales mejoraron considerablemente las correlaciones.

#### 3.4. Producciones del CRP

Durante el periodo de experimentación, la producción de condensación acumulada fue  $20,76 \text{ mm}$ , mientras que el modelo sobreestimó ligeramente estas valores ( $22,15 \text{ mm}$ ). Estos resultados están en concordancia con los resultados obtenidos en otras regiones mediterráneas donde han cuantificado la formación de condensación atmosférica usando este tipo de tecnología (Muselli et al., 2002, Sharan et al., 2011).

## 4. Conclusiones

En general, el modelo propuesto representa una base fundamental para describir y explicar los mecanismos que forman parte del balance de energía de condensadores radiativos pasivos.

Los resultados indican que el modelo es capaz de simular de forma precisa  $T_s$  y la formación de rocío. El filtro aplicado, que permitió eliminar los datos de entrada cuando la  $HR$  fue menor de 80%, ofrece beneficios positivos en el funcionamiento del modelo.

La estimación precisa de  $T_s$  es un buen indicador de la formación de condensación sobre una superficie. Por tanto, ante la dificultad de cuantificar la formación de rocío sobre otras superficies tales como masas de agua o coberturas de sombreado suspendidas, la comparación de las diferentes temperaturas de superficie podría generar estimaciones precisas de formación de condensación.

Este estudio podría ayudar a agencias del agua a realizar estimaciones sobre la producción de condensación que podría ser recogida desde la atmósfera para ser usada como recurso adicional en regiones hídricamente estresadas, evitando la construcción de dispositivos que permitan identificar la idoneidad o no de la recolección de condensación nocturna.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por parte de la Fundación Seneca (02978/PI/05) y del Ministerio de Ciencia e innovación (AGL2010-15001).

## Referencias

- [1] Beysens, D., Muselli, M., Nikolayev, V., Narhe, and Milimouk, I. (2005) Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas *Atmospheric Research* 73, 1–22.
- [2] Maestre-Valero, J.F., Martínez-Alvarez, V., Baille, A., Martín-Górriz, B., Gallego-Elvira, B. (2011). Comparative Analysis of Two Polyethylene Foil Materials for Dew Harvesting in a Semi-arid Climate. *Journal of Hydrology* 410, 84–91.
- [3] Pedro, M.J. and Gillespie, T.J. (1982). Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agricultural Meteorology* 25, 283–296.
- [4] Nilsson, T.M.J. (1996). Initial experiments on dew collection in Sweden and Tanzania. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 40, 23–32.
- [5] Jacobs, F.G.A., Heusinkveld, B.G. and Berkowicz, S.M. (2008). Passive dew collection in a grassland area, The Netherlands. *Atmospheric Research* 87, 377–385.
- [6] Beysens, D., Milimouk, I., Nikolayev, V., Muselli, M. and Marcillat, J. (2003). Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield. *Journal of Hydrology* 276, 1–11.
- [7] Muselli, M., Beysens, D., Marcillat, J., Milimouk, I., Nilsson, T. and Louche, A. (2002). Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica island, France). *Atmospheric Research* 64, 297–312.
- [8] Sharan, G., Clus, O., Singh, S., Muselli, M., Beysens, D. (2011). A very large dew and rain ridge collector in the Kutch area (Gujarat, India). *Journal of Hydrology* 405, 171–181