

“Evaluación de la velocidad de evaporación de gotas en aplicaciones de atomización, mediante tres procedimientos diferentes”

Herrera, Mildred^a, Renaudo, Carlos^{a,b}, Bertin, Diego^{a,b}, Bucalá, Verónica^{a,b}

^a Planta Piloto de Ingeniería Química – PLAPIQUI (UNS – CONICET), Bahía Blanca, Argentina

^b Departamento de Ingeniería Química – Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina

mherrera@plapiqui.edu.ar

Resumen

En aplicaciones de atomización en que las gotas formadas se exponen al aire ambiente, la velocidad de evaporación de estas mismas suele ser un factor crítico en la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. En este trabajo se presentan mediciones de velocidad de evaporación de gotas de agua realizadas en el equipo OCA 15 EC (DataPhysics) mediante el análisis de imágenes del cambio de volumen de la gota en el tiempo. Específicamente, se comparan los resultados obtenidos mediante tres procedimientos diferentes a 25/35°C y HR 30/50%. En el primer método, se analiza la velocidad de evaporación mediante el método de la gota pendiente, registrando el cambio de volumen de gota suspendida en una aguja en función del tiempo. El segundo método es similar al anterior, pero inyectando líquido durante la medición a fin de mantener un volumen constante de gota que compense el líquido perdido por evaporación. Por último, se analiza, mediante el método de la gota sésil, la velocidad de evaporación en una gota depositada en un sustrato de policarbonato, registrando el ángulo de contacto entre gota y superficie y el volumen de la gota en función del tiempo. De esta forma, el caudal inyectado se puede considerar igual a la velocidad de evaporación. Se observan resultados similares para la velocidad de evaporación medida mediante los 3 procedimientos, se destaca la eficacia del tercer procedimiento para analizar la influencia de la superficie de gota sobre la velocidad de evaporación.

Palabras clave: *Velocidad de evaporación, Procedimiento experimental, Análisis de imagen, Aplicaciones de atomización.*

INTRODUCCIÓN

Los productos de protección de cultivos (PPC) suelen aplicarse para prevenir enfermedades y controlar malezas e insectos en el campo. Habitualmente estos productos se aplican en forma de gotas producidas mediante pulverización a través de boquillas (Matthews et al., 2014). La calidad de la aplicación depende de la distribución del tamaño de gotas (DSD) atomizadas, de las propiedades fisicoquímicas del líquido pulverizado, de las condiciones ambientales, de las condiciones operativas, de la tecnología utilizada para realizar la aplicación y de las habilidades del operador (Cunha et al., 2021; Chapman & Doom, 2021). Factores como la deriva (el movimiento de las gotas por el viento fuera de la zona objetivo), la volatilización de principios activos, el escurrimiento (la pérdida de plaguicida a través de la superficie del suelo sin absorción por las hojas) y la lixiviación (el movimiento de los agroquímicos a través del suelo) pueden causar pérdidas indeseables para los agricultores y suponer una fuente potencial de contaminación ambiental (Srivastava et al., 2009).

La evaporación del producto aplicado afecta tanto a la gota durante el vuelo como a la gota depositada. La evaporación depende de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa), de las propiedades de la mezcla que se evapora y de la superficie donde ocurre la evaporación. En la mayoría de las aplicaciones de PPC, la presión de vapor de los compuestos activos es considerablemente menor a la del agua, por lo cual la tasa de evaporación de estos también es menor a la del agua (Holterman, 2003). Dependiendo de la técnica que se utilice para medir la tasa de evaporación, se puede analizar la influencia de diferentes factores sobre la tasa de evaporación

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es comparar tres procedimientos para medir la evaporación de agua a fin de determinar la replicabilidad de resultados y recomendar el procedimiento en base a la variable a analizar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones se realizaron utilizando el equipo OCA 15EC (Dataphysics Instruments GmbH, Filderstadt, Alemania). El sistema experimental consiste en un sistema de medición por vídeo que incluye una cámara en blanco y negro USB de alta velocidad, un soporte de jeringa de precisión y un sistema mecánico de inyección de líquido controlado por software para garantizar una caudal constante de fluido. Se utilizó el software dpiMAX (versión 2.0.118) para recoger, evaluar y valorar los datos medidos.

Para mantener las condiciones de humedad y temperatura en los ensayos que lo requerían se utilizó la cámara de control ambiental TFC 100Pro (Dataphysics Instruments GmbH, Filderstadt, Alemania) en conjunto con un baño de circulación de líquido (Julabo USA Inc.) utilizando agua como fluido térmico y el sistema de control de humedad de aire HGC20 (HGC20, DataPhysics Instruments GmbH, Filderstadt, Germany).

Tres metodologías de toma de datos fueron analizadas:

- Metodología 1: Evaporación de una gota pendiente sin inyección de caudal durante el proceso de evaporación a condiciones de temperatura y humedad controladas. Se registra en intervalos de tiempo regulares el volumen de la gota obtenido a través de análisis de imagen. El tiempo en promedio de evaporación es aproximadamente 500s. Se analizaron combinaciones de temperatura (25, 35 y 55 °C) y humedad relativa (30, 50 y 80%).
- Metodología 2: Evaporación de una gota pendiente con inyección de caudal regulado y constante durante el proceso de evaporación. Si el caudal evaporado es menor al inyectado, el volumen de la gota incrementa con el tiempo. Lo opuesto ocurre si el caudal evaporado es mayor al inyectado. Se consideró que el caudal evaporado es igual al inyectado cuando el volumen de la gota no cambia en más de 200 segundos. En este caso se realizó la evaporación en condiciones de elevada evaporación (34°C y 20% de HR) y se analizaron gotas cuya superficie varió entre 17mm² a 36 mm²
- Metodología 3: Evaporación de una gota depositada en un sustrato de policarbonato, sin inyección de caudal durante la evaporación en un

ambiente a 34°C y 20% de HR. Se monitorea en conjunto el ángulo de contacto. La duración de los ensayos fue de 260 a 500 segundos. Se descartaron los datos donde el ángulo de contacto es menor a 20° ya que se observaron errores en la aproximación del volumen medido por el software.

El caudal evaporado se calculo mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{evap} = Q_{inye} - \frac{V_i - V_f}{t_{total}} \quad (1)$$

donde Q_{evap} es la tasa de evaporación (reportado en uL/s), Q_{inye} es el caudal inyectado (uL/s), t_{total} es el tiempo total de evaporación (s) y V_i y V_f son el volumen inicial y final de la gota, respectivamente.

Para las metodologías 1 y 3 Q_{inye} es cero, mientras que para la metodología 2 $\frac{V_i - V_f}{t_{total}}$ es cero cuando la gota tiene la superficie que genera el mismo caudal evaporado que inyectado.

RESULTADOS

En la Tabla 1, se presentan los resultados de los ensayos de la metodología 1. Se incluye además la diferencia entre la temperatura del ensayo (T) y la temperatura de bulbo húmedo correspondiente (T_{bh}). Entre el caudal evaporado y la diferencia de temperaturas existe una relación lineal (coeficiente de regresión $R^2 = 0.979$)

Tabla 1. Caudal evaporado medido usando metodología 1.

T	HR	T-T _{bh} (T,HR)	Q _{evap} (μL/s)
15	80	2.03	1.19E-03
25	80	2.65	1.54E-03
35	80	3.22	2.04E-03
15	55	4.79	2.25E-03
25	55	6.37	3.10E-03
15	30	7.81	4.07E-03
35	55	7.91	4.77E-03
25	30	10.68	5.74E-03
35	30	13.63	7.80E-03

La dependencia lineal observada de la evaporación de una gota de agua con la diferencia de temperatura ambiente y de bulbo húmedo para los tamaños de gota analizados está en concordancia con lo reportado por otros autores (Holterman, 2003; Lebeau et al., 2011). En la Fig. 1 se presentan el caudal evaporado frente a la superficie disponible de la gota (S) obtenidos

experimentalmente mediante la metodología 2. Se observa una correlación lineal entre el caudal evaporado y la raíz de la superficie disponible ($R^2=0.96$).

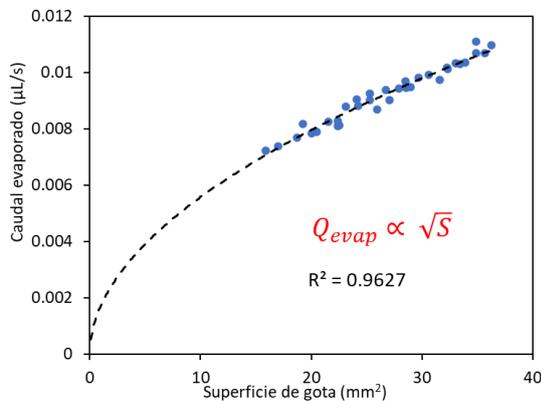


Figura 1. Caudal evaporado frente a superficie disponible medido usando metodología 2.

En base a los resultados obtenidos por la metodología 1 y 2 se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_{evap} = C(T - T_{bh})\sqrt{S} \quad (2)$$

donde C es una constante ajustada utilizando mínimos cuadrados y los datos experimentales de los ensayos de la metodología 1 y 2 cuyo valor es $1.16 \times 10^{-4} \text{ uL}/(\text{s}^\circ\text{C mm}^{1/2})$.

El cambio de volumen de gota respecto al tiempo medido usando la metodología 3 se muestra en la Fig. 2. Se incluye además la aproximación al volumen esperado utilizando la Ec. 2.

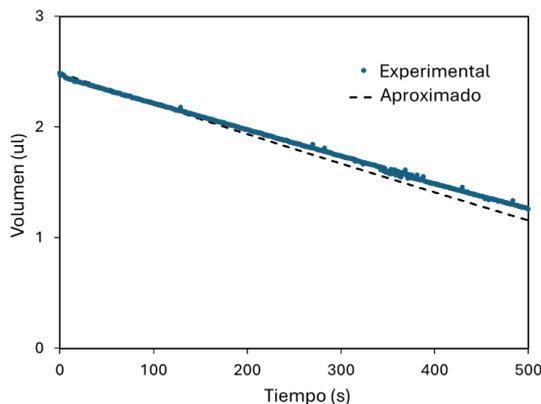


Figura 2. Volumen de gota respecto al tiempo usando metodología 3 y aproximación mediante Ec. 2.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se concluye que la evaporación de una gota de agua depende linealmente de la diferencia de temperatura ambiente y de bulbo húmedo para los tamaños de gota analizados. A su vez se observó que el caudal evaporado depende de la raíz cuadrada de la superficie disponible para la evaporación. Utilizando los datos experimentales de gota pendiente se presentó una ecuación que permite predecir el cambio de volumen para gotas pendientes o depositadas.

Respecto a las metodologías, se observan resultados similares para la velocidad de evaporación medida mediante los 3 procedimientos, se destaca la de la metodología 2 para analizar con mayor sensibilidad el efecto de la superficie disponible frente al caudal evaporado que las metodologías 1 y 3. La metodología 1 es la más usada en ensayos de evaporación de gotas. Si la superficie de la gota cambia considerablemente con el volumen de la misma, es recomendable realizar ensayos más cortos para evitar cambios en la velocidad de evaporación debido a variaciones en la relación superficie/volumen de gota. La metodología 3 permite analizar el efecto de esparcimiento de la gota en una superficie sobre la evaporación. Igualmente, cuando el ángulo de contacto entre la gota y la superficie es bajo (20 grados o menos) el software utilizado generó oscilaciones en el volumen medido que no correspondían al cambio observado.

BIBLIOGRAFÍA

- Cunha, J. P. D., Alvarenga, C. B. D., Rinaldi, P. C., Marques, M. G., & Zampiroli, R. (2021). doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n2p245-254/2021.
- Chapman, Z., & Doom, J. (2021). doi:10.4081/jae.2021.1104
- Holterman, H. J. (2003). Kinetics and evaporation of water drops in air (No. 2003-12). IMAG.
- Lebeau, F., Verstraete, A., Stainier, C., & Destain, M. F. (2011). doi:10.1016/j.compag.2011.04.009
- Matthews, G., Bateman, R., & Miller, P. (2014). Pesticide application methods. John Wiley & Sons.
- Srivastava, S., Goyal, P., & Srivastava, M. M. (2009). Pesticides: Past, present, and future. In L. M. L. Nollet & H. S. Rathore (Eds.), Handbook of pesticides: Methods of pesticide residues analysis (p. 628). CRC Press.