

CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE GOTAS DE ASPERSION

FABIO R. LEIVA¹

Palabras claves: técnicas de aplicación de pesticidas; teoría de gotas; aspersiones.

Resumen. Se revisan aspectos básicos y aplicados sobre los fenómenos que gobiernan el comportamiento de las gotas de aspersión, explicando parámetros físicos comúnmente considerados en aplicaciones de tratamientos químicos y discutiendo sus interrelaciones. Se analizan las pérdidas causadas por condiciones ambientales adversas y los factores que determinan la eficiencia de impacto y captura de gotas en las superficies de las plantas.

SOME CONSIDERATIONS ABOUT THE BEHAVIOUR OF SPRAY DROPLETS

Summary. Basic and applied features of the phenomena which determine the behaviour of spray droplets are reviewed. The physical parameters concerned with pesticide application techniques and their relationships are explained. Losses due to adverse environmental conditions and the main factors which determine both the droplet impaction and the catch efficiency on plant surfaces, are analyzed.

INTRODUCCION

El comportamiento de las gotas de aspersión se rige por una serie de fenómenos más o menos complejos que tienen que ver con aspectos físicos, aerodinámicos, meteorológicos, químicos y bioquímicos. El conocimiento de dichos fenómenos es una poderosa herramienta para la toma de decisiones por parte de quienes tienen que ver con las apli-

caciones de tratamientos químicos, lo cual seguramente redundará en una mejor técnica de aplicación y en una disminución en los costos. Si bien el artículo está dirigido básicamente hacia las aplicaciones en forma líquida (aspersión), parte de los conceptos que se analizan tienen igualmente validez en aplicaciones sólidas del tipo espolvoreo.

DEFINICIONES

Cuando se realiza una aplicación en forma líquida el producto es asperjado en gotas pequeñas de forma aproximadamente esférica. La gota constituye el vehículo o medio de transporte para hacer llegar la sustancia activa al blanco (planta, o sus partes constitutivas, suelo, insecto).

Volumen de una gota. Partiendo del supuesto de que las gotas son de tamaño esférico, su volumen puede determinarse de acuerdo con la fórmula:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

Donde: V: volumen; π : constante; R: radio

De acuerdo con esta fórmula, una disminución del radio R a la mitad causa una disminución del volumen en ocho (8) veces. En otras palabras, si con un volumen V se produce una gota de radio R, con el mismo volumen se puede producir ocho (8) gotas de radio igual a R/2. Dicha fórmula además muestra que el número de gotas de radio R que pueden producirse variará en la misma proporción en que se modifique el volumen V. Por ejemplo, con un volumen igual a 4 veces V se pueden producir cuatro (4) gotas de radio R.

Densidad de cobertura. La densidad de cobertura, o simplemente cobertura, se define como el número de gotas por centímetro que llegan y son retenidas por el blanco. La

¹ Profesor Asistente, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Apdo. Aéreo 78299, Bogotá, D.E., Colombia.

cobertura es un parámetro bastante importante en aplicaciones de tratamiento químico puesto que la efectividad biológica de una aplicación se ve afectada en alto grado por ella. Ciba (s.f. b) reportó ensayos realizados en diferentes sitios del mundo en los cuales se encontró que es posible conseguir alta efectividad biológica con densidades de cobertura adecuadas, incluso utilizando dosis de pesticidas inferiores a las recomendadas comercialmente.

Ciba (1987) recomendó las siguientes densidades de cobertura para un adecuado control: para herbicidas en preemergencia y la mayoría de insecticidas 20 gotas/cm² en el blanco; para herbicidas de post-emergencia 30-40 gotas/cm²; para productos que actúan sólo por contacto 50-70 gotas/cm². Obviamente estos valores sirven únicamente como guía y en ningún caso se interpretarán en términos absolutos. La determinación precisa de la densidad de cobertura debe consultar el complejo biológico-químico entre la plaga y el ingrediente activo. Así para productos sistémicos, debido a su traslocación, la densidad de cobertura será menor que para productos de contacto. Según Meijer (s.f.), los insectos-plaga móviles tienen una probabilidad alta de entrar en contacto con el químico, por lo cual la cobertura necesaria puede ser bastante baja (aún hasta 5 gotas/cm²). Para el control de insectos-plaga inmóviles, hongos y enfermedades microbianas se debe conseguir un cubrimiento casi total del follaje, así en un momento dado se pueden requerir hasta 100 gotas/cm².

De acuerdo con los planteamientos hechos anteriormente sobre producción de gotas, obsérvese que la densidad de cobertura depende del volumen de la aplicación y del tamaño de la gota (radio de la gota). Dicho tamaño se expresa normalmente en función del diámetro de la gota medido en micras ($\mu = 10^{-3}$ mm).

En la figura 1 se muestra la relación entre densidad de cobertura esperada (teórica) y tamaño de gota para diferentes volúmenes de aplicación. Nótese que para aumentar la densidad de cobertura se requiere aumentar el volumen de aplicación y/o disminuir el tama-

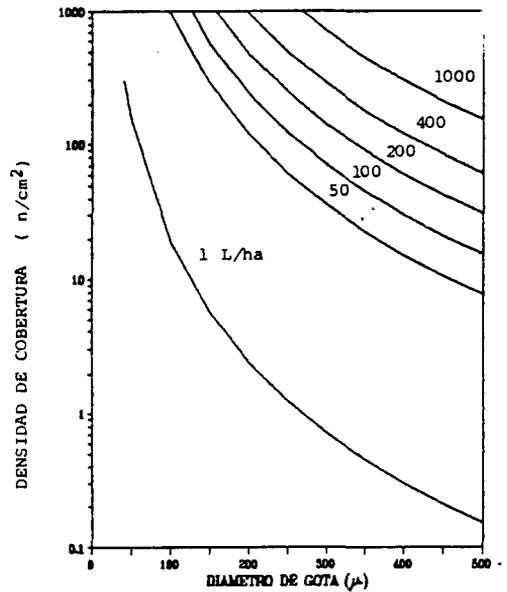


Figura 1. Densidad de cobertura teórica (gotas/cm²) vs. tamaño de gota para diferentes volúmenes de aplicación.

ño de la gota. Sin embargo es importante insistir en que la relación entre volumen de aplicación y densidad de cobertura es lineal y directa, mientras que la cobertura es inversamente proporcional al cubo del diámetro de la gota. Esto indica que una variación en el tamaño de la gota tendrá un efecto mayor sobre la densidad de cobertura (relación cúbica), que aquel causado por una variación en el volumen aplicado (relación lineal).

Diámetro promedio de gota. No existe un dispositivo de atomización (boquilla, disco rotatorio, etc) que produzca gotas del mismo tamaño². Realmente en una aspersión se encuentra un sinnúmero de gotas de diferentes tamaños el cual se denomina espectro de gotas.

Este hecho resulta desventajoso si se considera que las gotas más finas pueden ser arrastradas por el viento, mientras que las más gruesas pueden escurrir desde el follaje hasta el suelo.

Para poder describir y comparar diferentes patrones de aspersión es necesario referirse a un tamaño promedio de gotas. Diversos parámetros han sido propuestos para referirse al tamaño promedio de gota de una aspersión, entre los cuales están el Diámetro Volumétrico Medio (VMD), el Diámetro Numérico Medio (NMD), el Diámetro Sauter

² Aun cuando los discos rotatorios producen gotas de tamaño más uniforme que aquellas producidas por las boquillas hidráulicas.

y el Diámetro Medio de Masa (MMD). El más comúnmente usado es el VMD, el cual se define como aquel que divide el espectro de gotas en dos porciones, de tal manera que la suma de los volúmenes de todas las gotas mayores que el VMD es igual a la suma de los volúmenes de todas las gotas menores que el VMD. En la figura 2 se ilustra el concepto de VMD, mostrando una distribución aproximadamente normal en la cual el VMD divide la curva en dos porciones, ocupando cada una de éstas el 50% del área bajo la curva. El VMD se expresa en micras y de acuerdo con Ciba (s.f. a) corresponde aproximadamente a 0.45 del diámetro máximo.

El Diámetro Numérico Medio (NMD) se define como el diámetro de gota seleccionado de tal manera que el número de gotas de tamaño superior al NMD es igual al número de gotas de tamaño inferior al NMD. En una aspersión el VMD será mayor que el NMD, puesto que el primero considera el volumen de las gotas dando por consiguiente mayor énfasis a las gotas más grandes.

Crossley y Kilgour (1983) llamaron relación de dispersión a la relación VMD/NMD, indicando que una baja relación de dispersión muestra un mejor control del tamaño de gota, lo cual es usualmente más eficiente en términos de cantidad de químico y de agua requeridos; además sugirieron que una relación de dispersión inferior a 1.6 es recomendada para obtener mejores resultados.

El Diámetro Medio en Masa (MMD) es similar al VMD pero calculado con base en la cantidad de masa de las gotas. Cuando la densidad del líquido de una gota no varía con el tamaño de la misma, esto es cuando la evaporación es despreciable, la distribu-

ción de gotas con base en volumen es idéntica a la distribución con base en masa, resultando el VMD igual al MMD (Meijer, s.f.).

El Diámetro Sauter es otro parámetro comúnmente usado y se refiere a la relación entre el volumen total de gotas y la superficie total de las mismas.

Según Meijer (s.f.), en general un solo parámetro resulta inadecuado para evaluar el funcionamiento de un dispositivo de atomización, por lo cual se recomienda dar el VMD junto con el diámetro de gota al 16 y al 84% del volumen acumulado ("d16" y "d84"), o bien el VMD y el NMD, indicando el método de muestreo; otras veces se incluye el diámetro máximo de gota.

CONDICIONES METEOROLOGICAS

Cuando se realiza una aspersión solamente una parte del volumen total asperjado llega al área tratada (ver Figura 3). Una parte del total de gotas se pierde por evaporación y otra es arrastrada por el viento (fenómeno de deriva).

Deriva. La deriva se refiere a la cantidad de gotas que son desplazadas por efecto del viento fuera del área tratada. Además de las pérdidas del producto aplicado se corre el riesgo de causar contaminación, con los consecuentes efectos tóxicos sobre personas, animales o cultivos cercanos al área bajo tratamiento.

El fenómeno de deriva es esencialmente una función de la relación entre la velocidad de caída de las gotas y la velocidad horizontal del viento, siendo mayor con bajas velocidades de caída y altas velocidades del viento. Según Spillman (1980) y Matthews (1979),

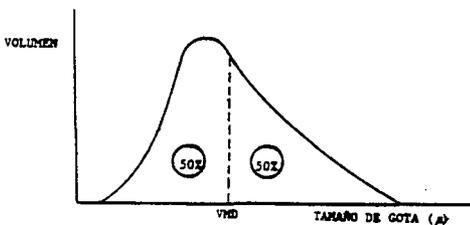


Figura 2. Diámetro Volumétrico Medio para una aspersión.

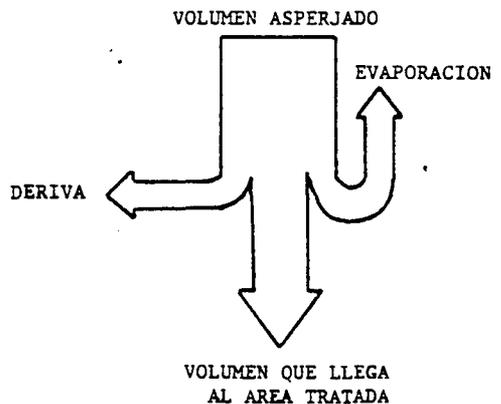


Figura 3. Volumen que llega al área tratada.

una gota que cae libremente con aire en calma se acelera por la fuerza de la gravedad, hasta un punto en el que la resistencia del aire contrarresta dicha fuerza; a partir de dicho punto la gota continúa su movimiento a una velocidad constante, conocida con el nombre de velocidad terminal. Dichos autores sugirieron utilizar la ley de Stokes para predecir la velocidad terminal de una gota bajo las condiciones anotadas, así:

$$V_s = g d^2 / 18\mu$$

Donde:

- V_s = velocidad terminal de la gota (m/s);
- ρ = densidad de la gota (Kg/m³)
- g = constante gravitacional (m/s²)
- d = diámetro de gota (m)
- μ = viscosidad del aire (N.s/m²)

En la Figura 4 se ilustra la velocidad terminal (calculada con la ley de Stokes) para gotas de agua de diferentes tamaños. Obsérvese que se presenta una considerable variación en dicha velocidad con pequeños cambios en el tamaño de la gota. Sin embargo, según Spillman (1980), la mencionada ley predice bien la velocidad terminal de gotas pequeñas, pero tiende a sobreestimarla en la medida en que se incrementa el tamaño de gota.

La distancia (S) a que se desplaza una gota de aspersión por efecto del viento puede calcularse de acuerdo con la siguiente fórmula (Matthews, 1979):

$$S = H U / V_s$$

Donde:

- H = altura de caída de la gota
- U = velocidad del viento

Ciba (s.f. b) propuso una gráfica para relacionar el porcentaje esperado de deriva en función del tamaño de gota y de las condiciones del viento (Figura 5). De acuerdo con dicha gráfica las gotas con diámetros inferiores a 80 μ se encuentran bastante expuestas a ser arrastradas por el viento, mientras que aquellas con diámetros superiores a 250 μ solamente sufrirán arrastre con "vientos fuertes".

La deriva también depende de la distancia desde el punto de emisión hasta el blanco. Así entre mayor sea dicha distancia, mayor será el riesgo de deriva; aspecto particular-

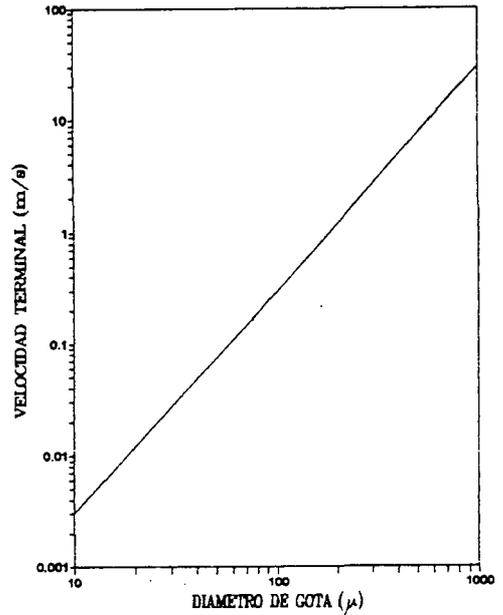


Figura 4. Velocidad terminal de gotas de agua de diferentes tamaños (a 20°C).

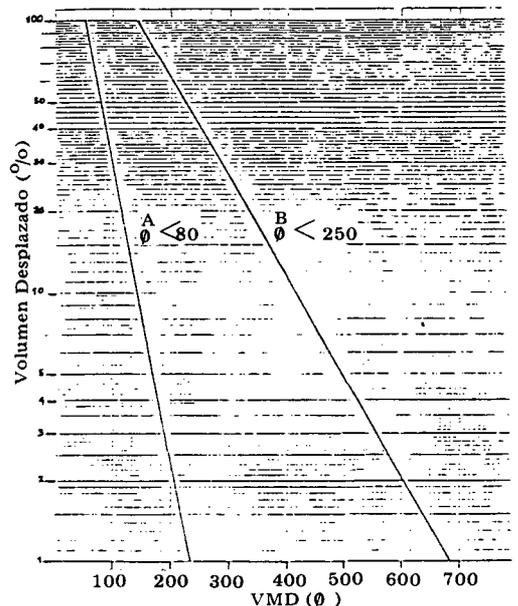


Figura 5. Volumen (% de gotas) que pueden desplazarse bajo condición de vientos ligeros A y de vientos fuertes B (Ciba, s.f. b).

mente importante en aplicaciones aéreas.

Sin embargo debe anotarse que el arrastre de las gotas por efecto del viento no es necesariamente un aspecto negativo. En primer lugar, las aplicaciones a campo abierto deben evitarse cuando no hay presencia de viento, puesto que la distribución de las gotas en el cultivo puede resultar muy pobre; y en segundo lugar, el mencionado efecto ha sido usado con equipos manuales en las denominadas aspersiones de deriva ("drift spraying"), en las cuales se aprovecha el viento para transportar pequeñas gotas (<70 micras) dentro del cultivo, incrementando sensiblemente el ancho de pase (Matthews, 1979; Meijer, s.f.).

Evaporación. La evaporación se refiere a la cantidad de gotas que pasan del estado líquido al estado gaseoso durante la aspersión. La evaporación ocurre con mayor facilidad en una aspersión de gotas finas debido a que existe una mayor superficie de contacto con el aire. El fenómeno de evaporación es esencialmente un proceso de transferencia de calor y de transferencia de masa (una parte o la totalidad de la masa de las gotas se transfiere al aire en forma de vapor), como consecuencia de las diferencias entre la temperatura del aire y de la gota de aspersión, y por efecto de la humedad relativa del aire. Amsden citado por Matthews (1979), propuso la siguiente fórmula para calcular el tiempo de extinción (t) de una gota de agua, medido en segundos:

$$t = d^2 / 80\Delta t$$

donde:

d = diámetro de la gota (micras)

Δt = diferencia de temperaturas entre los termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo.

En la figura 6 se ilustra el tiempo de extinción o tiempo que tarda la gota en evaporarse en función del tamaño de gota para diferentes Δt .

Matthews (1979) propuso calcular la distancia teórica de caída de una gota de agua por efecto de la gravedad antes de que eva-

por toda el agua, mediante la siguiente fórmula:

$$Dt = \frac{1.5 \times 10^{-3} d^4}{80 \Delta t}$$

Donde:

Dt = distancia teórica de evaporación (cm)

d = diámetro de la gota (micras)

En general, se puede afirmar que la evaporación será mayor en aspersiones acuosas, con temperaturas ambientales altas y/o humedades relativas del aire bajas (es común hablar del 60% de H.R. como límite inferior para realizar aplicaciones con soluciones acuosas). Igualmente, habrá mayor evaporación en la medida en que se incremente la distancia entre el punto de emisión y el blanco, puesto que la gota estará expuesta durante más tiempo a las condiciones adversas del medio ambiente antes de alcanzar el blanco.

Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de evaporación las gotas transfieren masa al aire circundante, disminuyendo su tamaño. Este hecho puede resultar bastante crítico, puesto que adicional a las pérdidas por evaporación se aumenta el riesgo de deriva.

VOLUMEN RECUPERADO

Anteriormente se anotó que del total de gotas asperjadas, una parte se pierde por deriva y otra debido a evaporación. Esto no significa que todo el volumen que llega al cultivo logre impactar y sea efectivamente retenido por el blanco. A pesar de que el volumen asperjado permanece dentro del área tratada, sólo una parte alcanza y permanece en el blanco³ (p. ej. pérdidas por escurrimiento de producto desde las hojas hasta el suelo).

Al volumen que finalmente alcanza y es retenido por el blanco se le denomina volumen recuperado o recuperación (ver Figura 7).

La eficiencia con la cual las gotas son retenidas por el blanco se encuentra afectada por el tamaño y velocidad terminal de la gota, y por las características del blanco (forma, tamaño y estructura de la superficie).

Condiciones para impacto. En la Figura 8 se ilustra el patrón que sigue una corriente

³ Himel, citado por Matthews (1976), denominó a este fenómeno "endoderiva", en contraste con "exoderiva", proceso en el cual el viento arrastra las gotas fuera del área tratada.

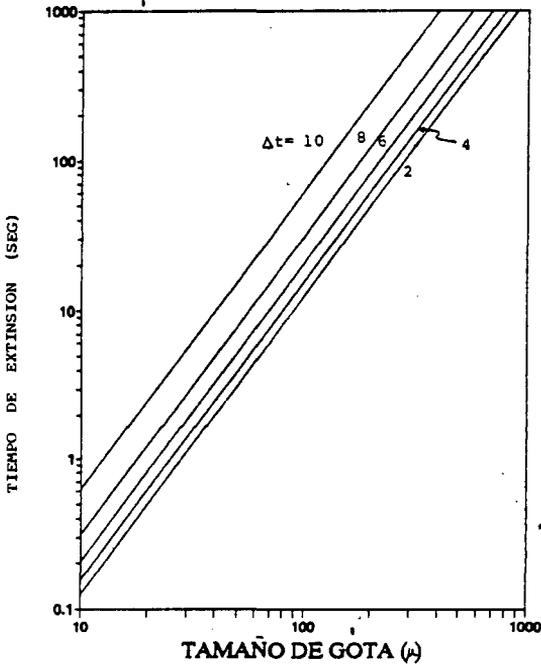


Figura 6. Tiempo de extinción versus tamaño de gota para diferentes valores de Δt .

de gotas avanzando a una cierta velocidad v , cuando se aproximan a un obstáculo. Obsérvese que las gotas de mayor tamaño impactan en el obstáculo, mientras que las gotas más finas se mueven alrededor del obstáculo superándolo. Esto ocurre debido a que las gotas más finas tienen poco impulso⁴, por lo cual no logran penetrar la película de aire que rodea la superficie del obstáculo (Meijer s.f.). Esto sugiere que una mayor captura de gotas se obtiene con gotas de mayor diámetro y/o aumentando la velocidad de las mismas. Sin embargo, ese comportamiento de las gotas más finas es una ventaja en aplicaciones en las cuales se requiere alcanzar el envés de las hojas o cuando se busca una mejor penetración del pesticida al interior del follaje. Este hecho puede asimilarse a un tamiz en el cual las hojas y tallos de la planta retienen las gotas de mayor tamaño permitiendo que las gotas más finas penetren al interior del follaje.

A medida que disminuye el tamaño de un

⁴ Impulso o cantidad de movimiento es igual a la masa del cuerpo multiplicada por su velocidad.

⁵ Tensión superficial es la propiedad de la película superficial de ejercer una tensión y es la fuerza necesaria para mantener la unidad de longitud de la película en equilibrio (Streeter, 1971).

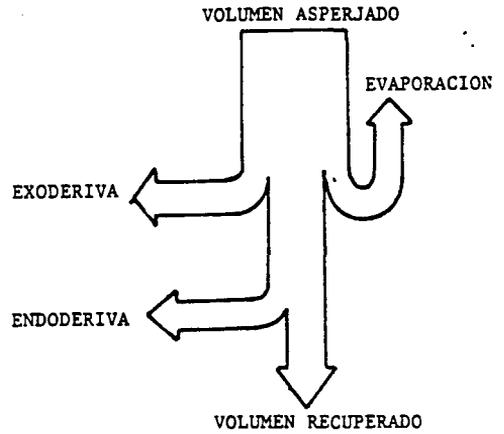


Figura 7. Volumen recuperado.

objeto la película de aire superficial que lo rodea decrece, por lo cual las gotas más finas pueden penetrar con relativa facilidad la película y ser capturadas por el objeto. En resumen se puede afirmar que los objetos de mayor tamaño son malos colectores de gotas finas, en tanto que los objetos pequeños (pelos, antenas, etc.) son buenos colectores de gotas finas (Meijer s.f.).

Angulo de impacto. El ángulo con el cual la gota impacta sobre una superficie también afecta la retención. Entre menor sea el ángulo de impacto (más cerca a la vertical) mayor será la probabilidad de que la gota sea retenida por la superficie (ver figura 9). A medida que se incrementa el ángulo de impacto habrá mayor probabilidad de que la gota golpee la superficie y rebote (Meijer, s.f.).

Angulo de contacto. El ángulo que se forma entre la superficie de la gota y la superficie de la planta es una medida importante de la eficiencia de captura de las gotas por la planta (ver figura 10). Cuando α excede 150° las gotas se depositan pobremente sobre la superficie y fácilmente pueden resbalar y caer. Cuando α es menor de 100° las gotas se depositan más fácilmente sobre la superficie y por lo tanto pueden ser retenidas. El ángulo de contacto depende de las características de la superficie de la planta (p. ej. en hojas cerosas el ángulo α será grande) y de la tensión superficial⁵ del caldo de aspersión. A mayor tensión superficial el ángulo α será mayor y por consiguiente menor la retención (Meijer, s.f.).

Otro aspecto a tener en cuenta, es el hecho de que a medida que se incrementa el ángulo de contacto, se disminuye el área de contacto entre la gota y la superficie; así

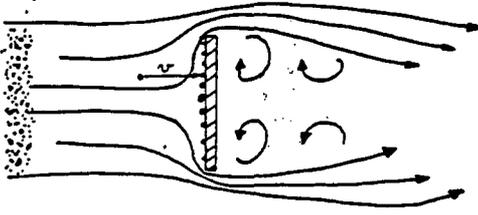
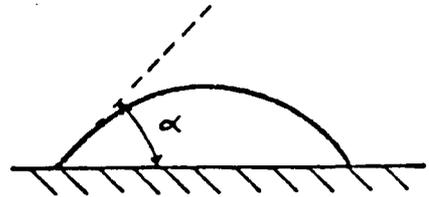


Figura 8. Corriente de aire con gotas de diferente diámetro aproximándose a un obstáculo.



$\alpha < 100^\circ$ MEJOR RETENCION

ANGULO DE IMPACTO

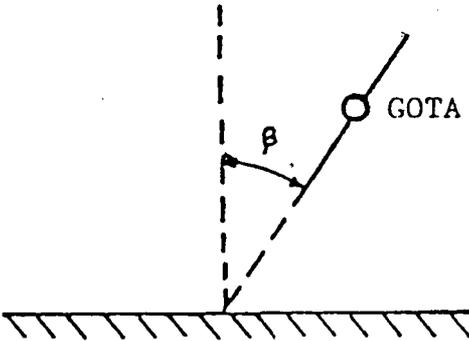
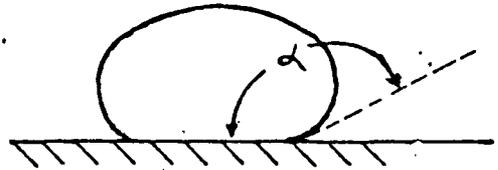


Figura 9. Angulo de impacto de una gota contra una superficie. (Adaptado de Meijer, s.f.).



$\alpha > 150^\circ$ TENDENCIA RESBALAR

Figura 10. Angulo de contacto entre una gota y la superficie de una hoja (Adaptado de Meijer, s.f.).

con valores altos de α se disminuye la efectividad del pesticida, aún en el caso de que la gota sea retenida.

La figura 11 muestra la relación entre el diámetro promedio de gota, la tensión superficial y la retención (en porcentaje) sobre hojas de guisantes (según Pfeiffer, Dewey y Branskill, citados por Meijer, s.f.). Obsérvese que los mayores porcentajes de retención se encontraron con gotas de diámetros cercanos a 112 y que al aumentar la tensión superficial se disminuye dicho porcentaje.

Una medida práctica para mejorar la retención es mediante el uso de surfactantes. Los surfactantes del tipo humectadores o hipotensores disminuyen la tensión superficial; los del tipo detergentes ayudan a quitar la grasa y la mugre de las superficies; y, los del tipo adherentes ayudan a pegar el pesticida a la superficie.

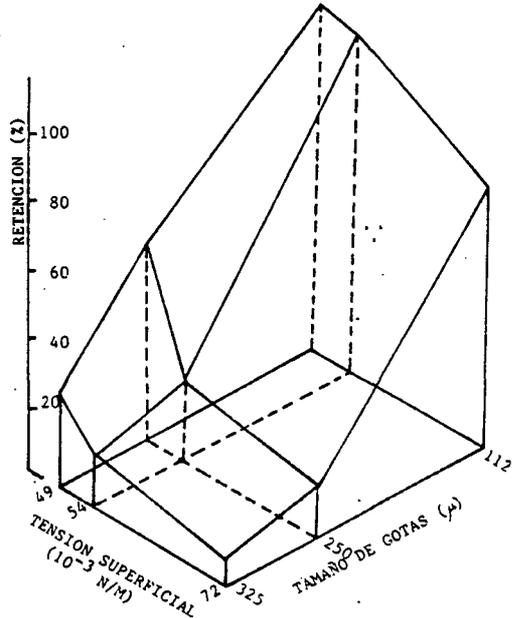


Figura 11. Relación entre tamaño de gota, tensión superficial y retención sobre hojas de guisantes (Según Pfeiffer, Dewey y Branskill).

Escorrimento. La cantidad de producto que se deposita sobre la planta depende del volumen de aplicación. En la figura 12 puede notarse que el depósito sobre una hoja se incrementa a medida que se aumenta el volumen aplicado hasta que se alcanza un punto en el cual se inicia el escurrimento (Lake, 1980). Volúmenes de aplicación superiores a dicho valor son ineficientes puesto que además de la pérdida de producto que se produce por escurrimento se disminuye el volumen depositado sobre la hoja.

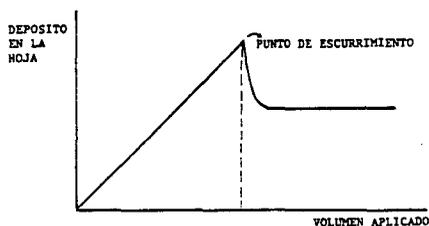


Figura 12. Relación entre el volumen de aplicación y el depósito sobre una hoja (Lake, 1980).

LITERATURA CITADA

1. CIBA-GEIGY. Técnicas de aplicación de agroquímicos. I parte. Ciba-Geigy Colombiana. Sin fecha.
2. CIBA-GEIGY. Técnicas de aplicación de agroquímicos. II parte. Ciba-Geigy Colombiana. Sin fecha.
3. CIBA-GEIGY. 1987. Técnicas de muestreo en el campo y criterios para evaluar un patrón de aspersión. Ciba-Geigy Ltda. Basilea.
4. Crossley, P., Kilgour, J. 1983. Small farm mechanization for developing countries. John Willey and Sons. México. 253 pp.
5. Lake, J.R. 1980. Particle capture by natural surfaces. Conferencia en Aerial Application of Pesticide, Volumen 1, Short Course. Cranfield, Gran Bretaña.
6. Matthews, G.A. 1979. Pesticide Application Methods. Longman, New York.
7. Matthews, G.A. 1976. The biological target. Presentado en el Simposio Droplets in air, Part 2. Gran Bretaña.
8. Meijer, R.J.M. Crop protection. Conferencia en International Course on Plant Protection. Mimeografiado, Wageningen, The Netherlands. Sin fecha.
9. Streeter. 1971. Mecánica de los fluidos. Mc Graw Hill, México. 747 pp.