



## ¿Por qué las gotas de lluvia son ubicuas en la naturaleza?

**Leonardo Di Girolamo Sigalotti**

[ldgsd@azc.uam.mx](mailto:ldgsd@azc.uam.mx)

Universidad Autónoma Metropolitana,  
Unidad Azcapotzalco

**Otto Rendón**

[ottorendon@gmail.com](mailto:ottorendon@gmail.com)

Centro de Investigación y de Estudios  
Avanzados, Instituto Politécnico Nacional

---

### Resumen

Las gotas se encuentran conformadas por pequeños volúmenes de algún líquido. Las más comunes en la naturaleza y en nuestra experiencia diaria de vida son las gotas de agua. En general, las gotas deben su existencia y forma a las llamadas fuerzas de tensión superficial, las cuales no sólo actúan sobre las moléculas superficiales y sus vecinas más cercanas, sino que también están dirigidas hacia el interior del líquido. La diferencia de presión entre un punto exterior a la gota y un punto interior a ella contiene información directa sobre el cociente entre la tensión superficial y su radio.

### Palabras clave

Gotas, tensión superficial, ecuación de Young-Laplace.

---

### Abstract

Drops are made up of small volumes of some liquid. The most common in nature and in our daily life experience are water droplets. In general, droplets owe their existence and shape to the so-called surface tension forces, which not only act on the surface molecules and their closest neighbors, but are also directed towards the interior of the liquid. The pressure difference between a point outside the drop and a point inside it contains direct information about the ratio between the surface tension and its radius.

### Keywords

Drops, surface tension, Young-Laplace equation.

---

Cita APA: Di Girolamo, L. y Rendón, O. (2024). ¿Por qué las gotas de lluvia son ubicuas en la naturaleza?. *Azcatl*, 2, 44-48.

DOI: [10.24275/AZCATL2024A006](https://doi.org/10.24275/AZCATL2024A006)

## Introducción

Las gotas líquidas se pueden encontrar en una gran variedad de formas posibles dependiendo de su tamaño y de si están o no adheridas a una superficie. Se puede definir una gota de cualquier líquido como una porción de dicho líquido confinada en un pequeño volumen esferoidal cuando su radio es suficientemente pequeño y no está en contacto con una superficie. Si bien las gotas pueden deformarse fácilmente, las de menor tamaño tienden a ser más esféricas que las de mayor tamaño. Sin embargo, en ausencia de fuerzas externas, las gotas de cualquier líquido tienden a ser aproximadamente esféricas independientemente de su tamaño debido a las fuerzas cohesivas de tensión superficial (Berry, 1971).

Por lo que sí es posible formar gotas perfectamente esféricas de mayor tamaño repitiendo el conocido experimento de Plateau, el cual demuestra que aunque el aceite flota en el agua y se hunde en el alcohol, no obstante, se puede mezclar el agua y el alcohol de manera tal que la densidad de la mezcla iguale a la del aceite. Si mediante una jeringa se vierte una porción de aceite en la mezcla se formará una gota esférica, la cual permanecerá inmóvil, es decir, sin subir a flote y sin hundirse. La gota de aceite permanecerá suspendida y en equilibrio en la mezcla agua-alcohol debido a que la fuerza de flotación contrarresta a la fuerza de gravedad. Cabe entonces preguntarse, ¿cuál es la forma natural de los líquidos? Una respuesta apresurada sería que los líquidos no tienen forma; sin embargo, esta respuesta no es del todo correcta, ya que la experiencia de Plateau demuestra que en ausencia de gravedad y de otras fuerzas externas la forma natural de una masa líquida es la de una esfera. En otras palabras, una porción de líquido inmersa en otro líquido de igual densidad pierde su peso por el principio de Arquímedes, adoptando la forma de una esfera sin que la gravedad influya.

En particular, haciendo referencia a las gotas de agua, se sabe que las nubes se encuentran conformadas por diminutas gotas esféricas suspendidas en el aire, las cuales se forman por enfriamiento y condensación de vapor de agua (Mason, 1957; Pruppacher *et al.*, 1998). Dichas gotas colisionan entre sí para formar gotas de mayor tamaño. Al aumentar de tamaño, éstas no pueden flotar más

en el aire y caen por gravedad, fragmentándose en nuevas gotas de menor tamaño antes de alcanzar el suelo en forma de lluvia (Fournier d'Albe e Hidayetulla, 1955; Magarvey y Taylor, 1956; Villermaux y Bossa, 2009). El proceso de fragmentación en gotas siempre más pequeñas es el resultado de la deformación de las gotas de mayor tamaño por efectos aerodinámicos debido a la resistencia del aire (Magarvey y Taylor, 1956a). Por otro lado, es también fácil encontrar gotas colgantes y gotas sésiles tanto en la naturaleza como en muchos procesos industriales (Pozrikidis, 2012). Las gotas colgantes son aquellas que se forman cuando se coloca una pequeña cantidad de líquido en la parte inferior de una superficie. Un ejemplo recurrente de gota colgante es cuando se suspende una porción de líquido del extremo de una aguja. En este caso, la gota toma la forma de una pera como resultado de la relación entre la tensión superficial (o interfacial) y la gravedad. Contrariamente a las gotas colgantes, las gotas sésiles son aquellas que se forman cuando se coloca una porción de líquido sobre una superficie sólida, plana y uniforme. Estas gotas permanecen inmóviles y abarcan volúmenes en el rango entre los nanolitros y los microlitros (Sakakeeny y Ling, 2020). Sus formas varían entre perfectamente esféricas para gotas muy pequeñas y aplanadas para gotas de mayor volumen, y el grado de aplanamiento estará determinado por el balance entre las fuerzas capilares en la dirección normal a la superficie y la presión hidrostática (Rienstra, 1990).

En este artículo se discuten brevemente algunos fenómenos físicos que son la base de la existencia de las gotas líquidas y que ayudan a comprender las diferentes formas que toman las gotas en la naturaleza.

## Fuerzas de tensión superficial

Las fuerzas de tensión superficial son el resultado de la tendencia que poseen las moléculas de agua para atraerse entre sí y determinan la forma en equilibrio de las gotas (Berry, 1971). El estado de energía más bajo para una gota ocurre cuando las moléculas del líquido están rodeadas, mayormente, por todos lados por otras moléculas de líquido, lo que significa que la gota debe tener la mínima superficie posible, que corresponde precisamen-

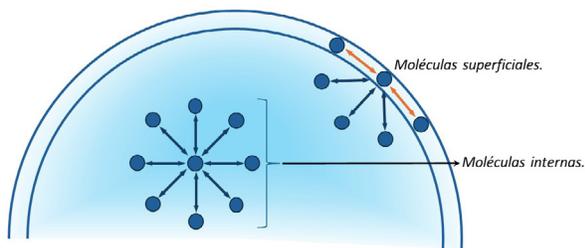
te a la de una esfera. El efecto de la gravedad aplana esta esfera ideal hasta darle la forma que vemos en muchos procesos y fenómenos recurrentes. En el caso de interfaces líquido-aire, que son las de mayor interés en muchos procesos, la tensión superficial se manifiesta como el resultado de una atracción mayor entre las moléculas líquidas (fuerzas de cohesión) que entre las moléculas de aire (fuerzas de adhesión).

La tensión superficial tiene dimensiones de fuerza por unidad de longitud o, equivalentemente, de energía por unidad de área. Como se muestra esquemáticamente en la Figura 1, en la interfaz líquido-aire existen dos fuerzas: (a) una fuerza atractiva entre las moléculas líquidas dirigida hacia dentro, la cual es normal a la interfaz, y (b) una fuerza tangencial, la cual es paralela en todo punto a la interfaz (Berry, 1971). Lejos de la interfaz y dentro del líquido, cada molécula experimenta una fuerza atractiva en todas las direcciones con sus moléculas vecinas (véase la Figura 1), de manera que la fuerza neta sobre la molécula es en promedio nula.

Matemáticamente, la tensión superficial,  $\sigma$ , se relaciona con la diferencia de presión entre un punto exterior y un punto interior a la gota,  $\Delta p$ , y la curvatura de la interfaz,  $H$ , mediante la ecuación de Young-Laplace (de Genes *et al.*, 2004; Butt *et al.*, 2006)

$$\Delta p = \sigma H = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son los radios principales de curvatura.



**Figura 1.** Representación esquemática de las fuerzas de tensión superficial en una gota de cualquier líquido.

En el caso de gotas perfectamente esféricas (es decir, cuando  $R_1 = R_2 = R$ ), la ecuación (1) se reduce a la expresión familiar

$$\Delta p = \sigma \frac{2}{R}. \quad (2)$$

A diferencia de una gota líquida, en una burbuja de agua en el aire existen dos superficies de contacto aire-agua, una interior y otra exterior, por lo que el lado derecho de la relación (2) debe multiplicarse por dos. El dominio espacial en el que es importante la ecuación (2) puede entenderse mejor si se introduce el concepto de longitud capilar,  $\lambda_c$ , que para una interfaz líquido-aire, como es el caso de una gota de lluvia, se puede escribir como

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}}, \quad (3)$$

donde  $\sigma$  es la tensión interfacial,  $g$  es la aceleración de gravedad y  $\Delta\rho$  es la diferencia de densidad entre los diferentes fluidos. La forma que toma una gota dependerá si su radio es mayor o menor que la longitud capilar. Por ejemplo, si su radio es menor que la longitud capilar entonces los efectos de la gravedad pueden despreciarse y su forma será esférica debido a los efectos dominantes de la tensión superficial.

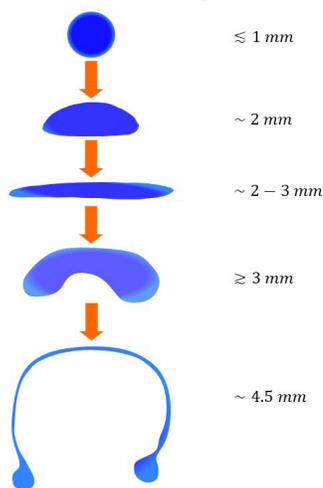
### Deformación y fragmentación de las gotas de lluvia

A medida que una gota de lluvia cae por su peso pierde su forma redondeada. Debido al flujo de aire alrededor de la gota, ésta se deforma pareciéndose a la mitad superior de un panecillo de hamburguesa, es decir, aplana en la parte inferior y con una cúpula curva en la parte superior. El flujo de aire en el fondo de la gota es más intenso que en la parte superior, donde pequeñas perturbaciones en la circulación del aire crean menos presión. La tensión superficial en la parte superior permite que la gota de lluvia permanezca más esférica, mientras que la parte inferior se aplana más.

La Figura 2 muestra esquemáticamente la deformación y fragmentación de una gota de lluvia durante su caída libre. A medida que sigue cayendo, la gota se hace más ancha y delgada debido a su fricción con el aire. El flujo frontal de aire provoca que la gota se encurve y se infle tomando la forma de un paracaídas, cuyos bordes inferiores forman bultos, los cuales se fragmentan en numerosas gotas diminutas con una distribución de tamaños que van desde 5 mm a valores submilimétricos. De esta manera, en su camino al suelo cada gota se fragmenta de forma aislada, es decir, independientemente de las otras gotas (Villermaux y Bossa, 2009).

### El tamaño de las gotas

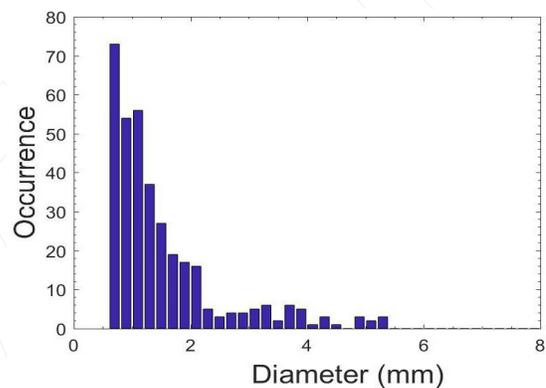
Las gotas de tamaño diminuto presentes tanto en las nubes como en la neblina poseen diámetros entre 5 y 10 micrómetros. El peso de dichas gotas es tal que la gravedad es despreciable y, por lo tanto, en su mayoría permanecen suspendidas en el aire debido a que el peso de las mismas se equilibra con las fuerzas de flotación impuestas por el aire. En el caso de las gotas de lluvia, éstas alcanzan diámetros del orden de los milímetros, con valores máximos de aproximadamente 5 mm, como resultado de las colisiones frecuentes y la coalescencia entre



**Figura 2.** Representación esquemática de la deformación y fragmentación de una gota de lluvia durante su caída al suelo.

gotas de tamaño micrométrico (Jermacans y Laws 1999). La pregunta de si existe un tamaño máximo para las gotas de agua en la naturaleza fue formulada por Vollmer y Möllmann (2013). En otras palabras, ¿es posible encontrar gotas de agua estables con tamaños por encima de los 10 mm? Mediante un experimento, estos autores produjeron una gota extremadamente grande de unos 15 cm de diámetro, llenando un globo expandible de goma con alrededor de 2 litros de agua. Luego de perforar el globo con una aguja afilada la goma se contrajo en milisegundos, dejando una enorme gota de aproximadamente 1 litro de agua en caída libre. Después de permanecer intacta una distancia de 5 a 7 m durante su descenso, se observó la desintegración espontánea de la gota en un número estimado de 1 millón de pequeñas gotas, con un pico en la distribución de tamaños entre 0.5 y 1.5 mm. En este experimento de laboratorio se observó, además, que las gotas más grandes tenían diámetros de aproximadamente 9 mm en comparación con los 5 mm observables en las gotas de lluvia. Como ejemplo ilustrativo, la Figura 3 muestra la distribución de tamaños para gotas de lluvia en el rango entre 0.6 y 5 mm (D'Adderio *et al.*, 2018).

En general, el proceso de desintegración se debe a la relación entre la fuerza de gravedad, las fuerzas de fricción del aire y la tensión superficial. En ausencia de gravedad y de resistencia del aire, gotas de tamaño arbitra-



**Figura 3.** Distribución de tamaños de gotas de lluvia en el rango entre 0.6 y 5 mm. Nota: Tomada de D'Adderio *et al.*, 2018.

rio pueden sobrevivir indefinidamente sujetas sólo a las fuerzas de tensión superficial (Weislogel y Lichter, 1998).

### Notas finales

En la naturaleza las gotas deben su existencia a las fuerzas de tensión superficial y su forma a la relación entre las fuerzas de tensión superficial y las fuerzas externas, como la gravedad y la resistencia del aire. La tensión superficial admite también una explicación en términos energéticos, por ejemplo, cuando una molécula líquida se encuentra rodeada por otras moléculas del mismo líquido en todas las direcciones, la molécula se encuentra en un estado de menor energía en comparación con las moléculas en la superficie de la gota, las cuales estando rodeadas por menos moléculas se encuentran en un estado de mayor energía. De esta manera, para que el líquido alcance un estado de mínima energía debe minimizar el número de moléculas superficiales, resultando así en un área de mínima superficie, que para el caso de una gota de cualquier líquido corresponde a la superficie de una esfera.

### Referencias

- Berry, M. V. (1971). The molecular mechanism of surface tension. *Physics Education*, 6(2), pp. 79-84. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/6/2/001/pdf>
- Butt, H. J., Graf, K. y Kappl, M. (2006). *Physics and chemistry of interfaces*. Wiley-VCH.
- D'Adderio, L. P., Porcù, F. y Tokay, A. (2018). Evolution of drop size distribution in natural rain. *Atmospheric Research*, 200, pp. 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.003>
- De Gennes, P. G., Brochard-Wyat, F. y Quere, D. (2004). *Capillarity and wetting phenomena*. Springer.
- Fournier d'Albe, E. M. e Hidayetulla, S. M. (1955). The break-up of large water drops falling at terminal velocity in free air. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81(350), pp. 610-613. <https://doi.org/10.1002/qj.49708135012>
- Jermacans, K. y Laws, K. (1999). Coalescence of raindrops in an electrostatic field. *The Physics Teacher*, 37, pp. 208-211. <https://doi.org/10.1119/1.880231>
- Magarvey, H. R. y Taylor, W. B. (1956). Free fall breakup of large drops. *Journal of Applied Physics*, 27(10), pp. 1129-1135. <https://doi.org/10.1063/1.1722216>
- Magarvey, H. R. y Taylor, W. B. (1956a). Shattering of large drops. *Nature*, 177, pp. 745-746. <https://doi.org/10.1038/177745bo>
- Mason, B. J. (1957). *The physics of clouds*. Clarendon Press.
- Pozrikidis, C. (2012). Stability of sessile and pendant liquid drops. *Journal of Engineering Mathematics*, 72, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1007/s10665-011-9459-3>
- Pruppacher, H. R., Klett, J. D. y Wang, P. K. (1998). *Microphysics of clouds and precipitation*. *Aerosol Science and Technology*, 28, pp. 381-382. <https://doi.org/10.1080/02786829808965531>
- Rienstra, S. W. (1990). The shape of a sessile drop for small and large surface tension. *Journal of Engineering Mathematics*, 24, pp. 193-202. <https://doi.org/10.1007/BF00058465>
- Sakakeeny, J. y Ling, Y. (2020). Natural oscillations of a sessile drop on flat surfaces with mobile contact lines. *Physical Review Fluids*, 5(12), 123604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.123604>
- Villermaux, E. y Bossa, B. (2009). Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops. *Nature Physics*, 5, pp. 697-702. <https://doi.org/10.1038/nphys1340>
- Vollmer, M. y Möllmann, K. P. (2013). Is there a maximum size of water drops in nature? *The Physics Teacher*, 51, pp. 400-402. <https://doi.org/10.1119/1.4820848>
- Weislogel, M. M. y Lichter, S. (1998). Water balloon rupture in low-g. *Physics of Fluids*, 10(9). <https://doi.org/10.1063/1.4739144>