

Determinación experimental de la velocidad de caída de la lluvia, mediante un modelo construido en el laboratorio

El fenómeno que hemos intentado investigar se lo hemos propuesto a nuestro Profesor de Física, tres estudiantes de 1º de Bachillerato, manifestándole el siguiente interrogante, ¿podríamos medir la velocidad con que cae la lluvia?

Aceptado el reto, el estudio que podemos realizar es únicamente de carácter cinemático, empleando los medios que usamos en las prácticas de Física de primero; un estroboscópico casero construido por nuestro profesor, una puerta óptica, una cámara digital y un ordenador desde donde controlamos las fotografías, además de emplear su hoja de cálculo. La idea consiste en construir un modelo de la caída de las gotas, soltándolas de forma controlada con un cuentagotas, de una en una, y registrar su trayectoria mediante la fotografía digital, como punto de partida del trabajo.

Se pensó, que los datos que el modelo puede proporcionar, podrían ser una buena aproximación para el conocimiento de la caída de las gotas de lluvia en el medio natural.

Planteamiento de hipótesis

Al iniciar el estudio con nuestro profesor nos contó, que cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido como por ejemplo el aire, aparece una fuerza de oposición a su movimiento, que se hace mayor al aumentar su velocidad, y que además de esta fuerza está también el peso. Al actuar dos fuerzas en sentidos contrarios y una ir aumentando, es de esperar que se igualen después de un cierto recorrido y a partir de ese instante, el movimiento será rectilíneo y uniforme. La velocidad que tenga en ese momento se llama velocidad límite, Consideramos tres hipótesis:

- El movimiento debe depender del volumen de las gotas.
- Debe existir una primera fase del movimiento con aceleración.
- Habrá finalmente una segunda fase con movimiento rectilíneo uniforme una vez alcanzada la velocidad límite.

La velocidad encontrada con este modelo para las gotas en la segunda fase, sería la velocidad que se estimaría como muy aproximada, para la velocidad límite de caída de las gotas de lluvia en el aire en calma.

Procedimiento experimental

La obtención de una fotografía durante la caída de una gota, en la que se observen distintas posiciones sobre la trayectoria, conociéndose también el instante correspondiente, se consigue mediante un disco estroboscópico que se hace girar con periodo constante mediante un motor



Fig.1

eléctrico y se mide el periodo de rotación con una puerta óptica que aprecia milisegundos, véase la fig.1 . Una ventanita practicada en el disco permite que pase la luz a la cámara fotográfica, una sola vez en cada vuelta. La cámara fotográfica se coloca en un trípode a este lado del disco, aparece en la fig.4

Para registrar los puntos de la trayectoria, es necesario mucho contraste entre la gota y el fondo, por lo que éste debe ser negro. Para observar la gota, fue necesario mezclarla con leche desnatada (blanca) y así lograr un gran contraste blanco-negro.

Las gotas deben soltarse con un cuentagotas situado en un lugar fijo, fig.2, y desde una buena altura, para tener la distancia suficiente que permita alcanzar la velocidad límite durante la caída. Este aspecto ha sido la máxima dificultad del experimento, al estar limitados por la altura del techo del laboratorio, 3,40 m y lo más que se ha podido subir el cuentagotas ha sido a 3 m del suelo. Como se observa en la fig.2, para iluminar se han empleado tres focos de 500 W cada uno, que deben encenderse en el momento de la caída de la gota.

El último elemento importante es el ordenador, donde instantáneamente se reciben las imágenes mediante un cable USB conectado a la cámara y así comprobar su calidad, fig.3. Es el centro de control del experimento, además, se utiliza posteriormente para imprimir las imágenes y realizar el tratamiento de datos experimentales mediante la hoja de cálculo EXCEL.

Los tres compañeros actuamos coordinados y muy atentos, dada la brevedad de la caída de la gota. Se tomaron 10 fotos útiles de cada una de las gotas para así reducir los errores experimentales.

En las fotografías aparece una regla con dos índices que va a servir para establecer un factor de escala.

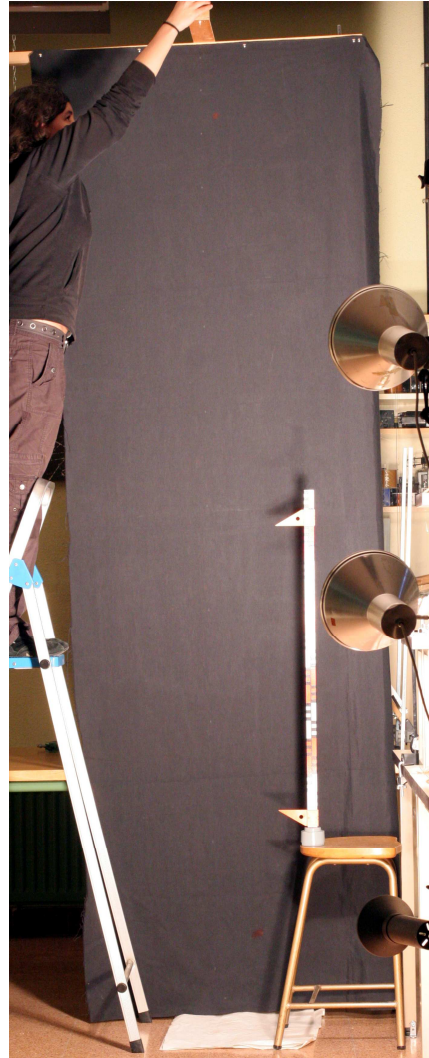


Fig.2

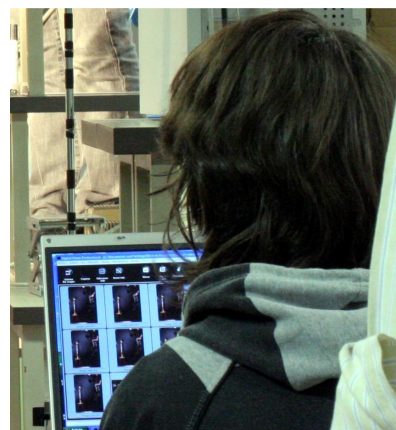
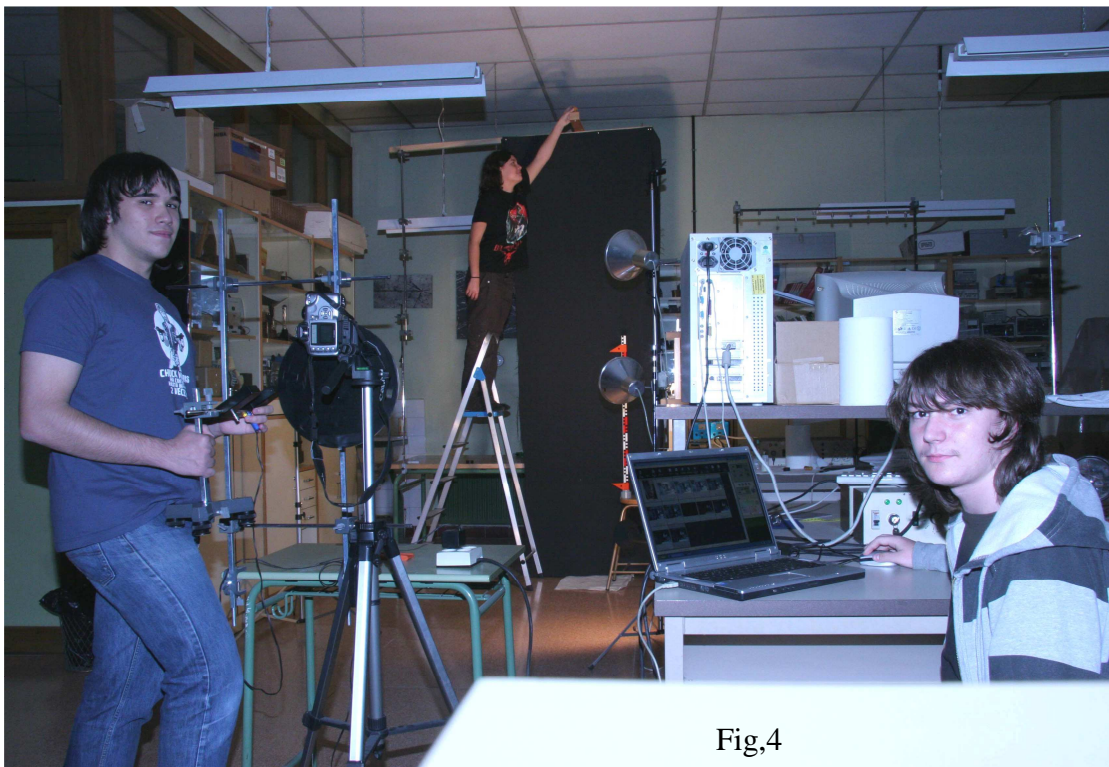


Fig.3

El montaje general aparece en la fig.4, y para hacer esta fotografía se tuvo que acercar el estroboscopio y la cámara al fondo negro, sin embargo, durante el trabajo experimental estos elementos están a 7,40 metros del fondo, para reducir el error de paralaje de la cámara. Se utilizó una digital CANON EOS-300D, con un objetivo de 50 mm, que tienen en el Departamento de Física.



Fig,4

Las dimensiones del laboratorio han impuesto unas limitaciones importantes a nuestro trabajo, puesto que la altura suelo-techo, es de 3,40 m y hemos podido soltar las gotas desde una altura de unos 3 m, aún siendo conscientes de la gran importancia que tiene la distancia recorrida por la gota, para que pueda llegar a alcanzar la velocidad límite. El conseguir esta altura nos supuso un verdadero laberinto de barras sujetas con nueces de laboratorio y listones de madera, ¡pero fue muy divertido!

Para tener un patrón de longitud, que nos permita pasar de las distancias medidas en las fotografías con una regla, X_F , a las distancias verdaderas recorridas por la gota, X , situamos en el plano vertical en el que caen las gotas una regla fija con dos índices separados 0,80 m. De este modo podemos definir un factor de equivalencia f , igual que hicimos con el profesor, en las prácticas del tiro parabólico.

$$f = \frac{0,80 \text{ m}}{\text{Distancia entre índices medida en la foto en cm}}$$

El volumen de las gotas se ha calculado tomando con una pipeta 5,0 mL, llenando cada cuentagotas y contando las gotas que caen hasta evacuar este volumen. Dividiendo 5,0 mL entre el número de gotas hallamos su volumen.

Resultó: $V_P = 47,6 \cdot 10^{-3} \text{ mL}$; $V_M = 54,3 \cdot 10^{-3} \text{ mL}$; $V_G = 66,7 \cdot 10^{-3} \text{ mL}$

Obtención de los datos experimentales

Se muestra una fotografía, fig.5, con los puntos de la trayectoria. El disco giraba con un periodo de 0,058 s, tiempo que separa cada dos posiciones de la gota en la fotografía. Para averiguar la influencia del tamaño de la gota hemos dejado caer cada una de las 3 gotas obteniendo de cada fotografía, las posiciones X_f y el tiempo t que aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1

G. Pequeña	$f=0,80m/8,00cm$	$X=X_f \cdot F$
t/s	X_f/cm	X/m
0,000	0,00	0,000
0,058	1,00	0,100
0,116	2,30	0,230
0,174	3,90	0,390
0,232	5,80	0,580
0,290	8,00	0,800
0,348	10,45	1,045
0,406	13,10	1,310
0,464	16,10	1,610
0,522	19,25	1,925
0,580	22,60	2,260
0,638	26,15	2,615
G. Mediana	$f=0,80m/8,13cm$	$X=X_f \cdot F$
t/s	X_f/cm	X/m
0,000	0,00	0,000
0,058	1,00	0,098
0,116	2,25	0,221
0,174	3,90	0,384
0,232	5,80	0,571
0,290	7,95	0,782
0,348	10,40	1,023
0,406	13,15	1,294
0,464	16,10	1,584
0,522	19,30	1,899
0,580	22,70	2,234
0,638	26,30	2,588
G. Grande	$f=0,80m/8,15cm$	$X=X_f \cdot F$
t/s	X_f/cm	X/m
0,000	0,00	0,000
0,058	1,05	0,103
0,116	2,45	0,240
0,174	4,10	0,402
0,232	6,10	0,599
0,290	8,35	0,820
0,348	10,90	1,070
0,406	13,70	1,345
0,464	16,75	1,644
0,522	20,05	1,968
0,580	23,55	2,312
0,638	27,25	2,675



Fig.5

Las gotas las hemos producido con tres cuentagotas de vidrio y para conseguir los distintos tamaños de gota, hemos limado las puntas con un grado distinto, para aumentar el orificio de salida de cada uno. Éste fue el único modo que teníamos, para conseguir los distintos volúmenes de gota.

Las gráficas posición-tiempo, del movimiento de las tres gotas, se representan juntas para efectuar el estudio comparativo de la influencia del tamaño de las gotas en el movimiento, fig,6.

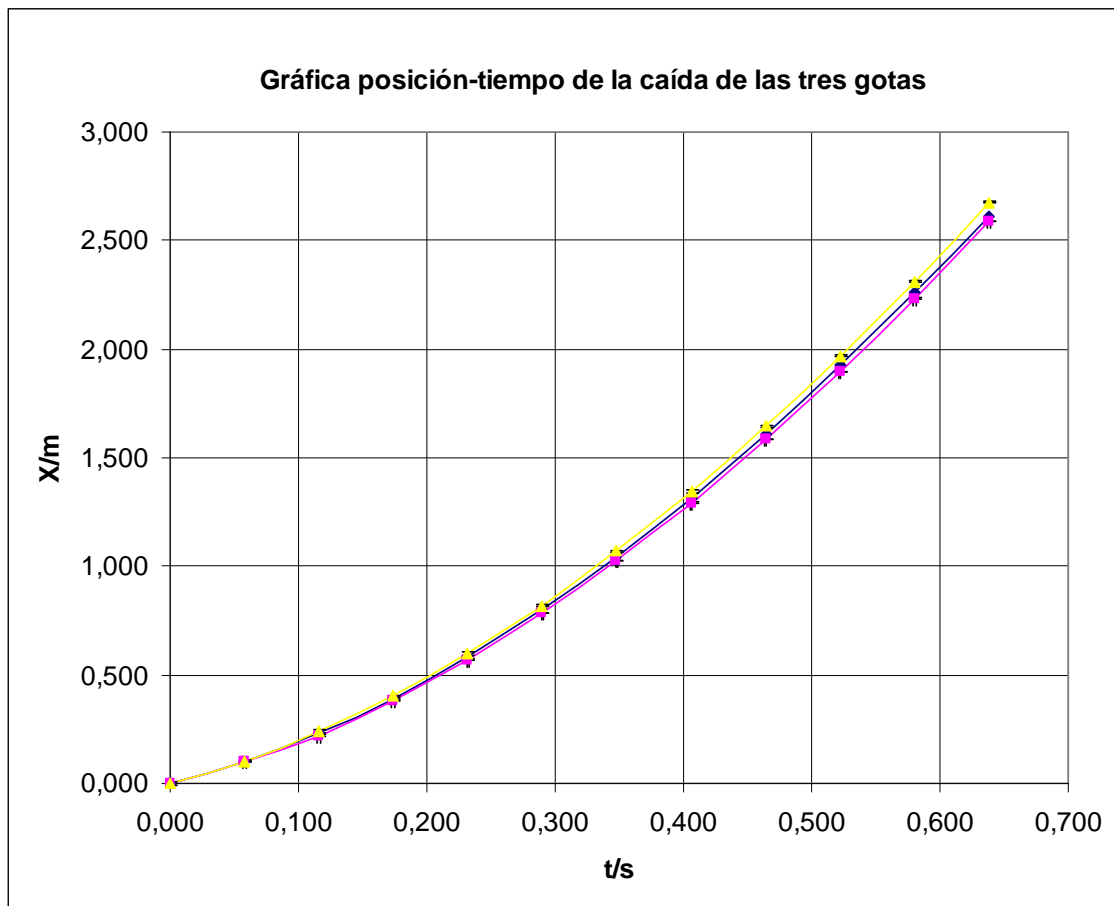


Fig.6

Las tres curvas parecen mostrar la misma tendencia, lo que viene a manifestar que con las pequeñas diferencias entre los volúmenes de nuestras tres gotas, no se pueden observar variaciones destacables en el movimiento de caída de cada una. Por otra parte, al estar las posiciones relacionadas con el tiempo mediante una curva, se prueba que los movimientos son con aceleración en la primera fase y que está va disminuyendo en los desplazamientos finales observados.

De la gráfica anterior se deduce, que para diferencias tan pequeñas entre los volúmenes de las gotas utilizadas, no se encuentran diferencias en sus movimientos, lo que está en contradicción con nuestra primera hipótesis, que debe ser modificada. Sin embargo, en todos los caso sí se confirma la segunda hipótesis, referente al movimiento con aceleración de las gotas en su primera parte de la caída.

El experimento se ha repetido 10 veces con cada una de las 3 gotas obteniéndose 30 fotografías, y una tabla de datos de cada una. De su análisis, y de la observación de curvas como las de la fig.6, deducimos que la aceleración del movimiento va disminuyendo, de hecho, en los intervalos finales, los desplazamientos en tiempos iguales, van creciendo más lentamente que en los desplazamientos anteriores.

Nuestro objetivo es buscar a partir de un cierto instante, aquellos desplazamientos que fueran iguales, en intervalos de tiempos iguales, que es lo que confirmaría que las gotas habrían alcanzado una velocidad de caída constante.

Encontramos una imposibilidad física de disponer de una distancia mayor en el laboratorio para soltar las gotas, pero afortunadamente, el escenario del salón de actos nos ofrecía una entreplanta, desde donde soltar las gotas desde una altura de 5 metros. Como vimos que la influencia del volumen de nuestras gotas no resultaba significativo en su movimiento, decidimos resolver esta nueva parte usando únicamente la gota mayor, de volumen $V_G = 66,7 \cdot 10^{-3} \text{ mL}$.

En la fotografía adjunta solo aparece la última parte de la caída de unos 2,30 m de longitud, porque es donde se alcanza la velocidad límite. La primera zona ya se había estudiado con anterioridad. De esta foto solo hemos tomado los dos últimos desplazamientos, encontrando los resultados que aparecen en la Tabla 2.

Desplazamiento/m	Intervalo de tiempo/s	Velocidad m/s
0,432	0,060	7,200
0,435	0,060	7,250

Al ser la velocidad casi igual en ambos desplazamientos, es la prueba de que la gota ha alcanzado la velocidad constante de caída. En consecuencia, en las condiciones del experimento, basta con determinar la velocidad en el último tramo para hallar la velocidad límite.

Hemos repetido en estas condiciones el experimento **nueve veces**, para calcular en cada uno la velocidad límite y así mediante el cálculo del valor medio de



estas medidas, dar un valor más fiable para la velocidad límite. Los datos aparecen en la Tabla 3, donde se preparan también otras columnas para calcular la desviación típica de las medidas.

$$V_m = \frac{\sum V_i}{n} ; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (V_i - V)^2}{n-1}}$$

Tabla 3

$V_i / m \cdot s^{-1}$	$V_i - V_m$	$(V_i - V_m)^2$
7,245	-0,027	0,001
7,098	-0,174	0,030
7,359	0,087	0,008
7,266	-0,006	0,000
7,359	0,087	0,008
7,200	-0,072	0,005
7,316	0,044	0,002
7,273	0,001	0,000
7,333	0,061	0,004
$\sum = 65,448$		$\sum = 0,063$

$$V_m = \frac{65,48}{9} = 7,272 \frac{m}{s}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (V_i - V)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,063}{8}} = 0,089$$

Tomando el valor $3 \cdot \sigma$ para el error de la medida, tendremos la probabilidad de que aproximadamente el 99% de los valores que midamos, difieran en menos de $3 \cdot \sigma = 3 \cdot 0,089 = 0,267 \approx 0,3$ del valor medio hallado.

Hemos medido como velocidad de caída de las gotas:

$$V = 7,3 \pm 0,3 \frac{m}{s}; \quad V = 26,3 \pm 1,1 \frac{km}{h}$$

Consideramos que cuando en el medio natural, el aire esté en calma y se dan condiciones similares a las que hemos tenido en el laboratorio, la velocidad de caída de las gotas no debe diferir mucho del valor encontrando, constituyendo este valor, una buena estimación para la velocidad de caída de la lluvia.

Somos conscientes que en muchas ocasiones, los volúmenes de las gotas de lluvia deben ser muy superiores al de las gotas que nosotros hemos podido producir y estudiar. En estos casos la velocidad podría variar bastante de la que hemos encontrado, pero ya sería el objetivo de otra investigación.

Conclusiones

El experimento ha permitido verificar que las gotas de lluvia en su primera fase del movimiento de caída, se mueven con aceleración. Que cuando los volúmenes de las gotas difieren poco entre sí, sus movimientos siguen

prácticamente la misma ley. Que la velocidad de caída de gotas pequeñas es de unos 26 km/h.

De nuestras hipótesis se han verificado dos, mientras que la correspondiente a la dependencia del volumen, dentro de nuestro pequeño margen de variación, debe ser rechazada y modificada tal como ya hemos explicado con anterioridad.

En cuanto a nuestra opinión personal, queda añadir que en cuanto nuestro profesor nos propuso participar en el concurso, aceptamos sin dudar, pues eso se convertiría en nuestra primera experiencia de investigación. Aunque no fue un camino de rosas y encontramos un pequeño fracaso por las imposibilidades físicas que teníamos, no desfallecimos y continuamos hasta poder alcanzar nuestro objetivo. Hemos comprendido así el misterio y la gracia de la física, saber superar las barreras para poder entender las causas de los fenómenos y sus comportamientos. El trabajar en equipo nos ha permitido proponer ideas y aceptar las de los demás, lo que consideramos muy positivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Fernández-Hernández-Solá. Prácticas cuantitativas de Física con fotografía digital. Vol. 1, Mecánica. COMUNIDAD DE MADRID 2005.
- Hernández-Solá-Fernández. Caída libre. Realidad y modelos. Revista Española de Física. Enero 2006, Vol. 20.
- Fernández-Segador-Hernández-Lozano. Física y Química de 1º de Bachillerato. ENLACE 1. Vicens-Vives. 2007.