

La luz como herramienta para estudiar los fluidos



El creciente conocimiento de las propiedades de la luz y el desarrollo de la óptica permiten avances importantes en la investigación de los fluidos y de las ondas acústicas que se producen y se propagan en ellos.

Catalina Stern

INTRODUCCIÓN

La luz nos permite disfrutar cotidianamente de muchos fenómenos naturales muy bellos: un arco iris, una puesta de sol, el cielo estrellado por las noches. Muchas de nuestras actividades diarias son posibles gracias a la luz, pues la requerimos para ver.

La luz ha sido también uno de los temas más importantes de la investigación fundamental. Varios grandes científicos se han preocupado por entender la naturaleza y el comportamiento de la luz, y los avances en esta área del conocimiento han sido tan grandes que actualmente no sólo comprendemos los fenómenos luminosos, sino que podemos estudiar otros por medio de la luz. A través de la luz y su espectro se pueden identificar los elementos de la tabla periódica, se ha podido estudiar

la composición y movimiento de las estrellas y de otros objetos celestes, y se puede determinar el tamaño y la composición de los contaminantes en la atmósfera. Hay múltiples aplicaciones en medicina y telecomunicaciones que se basan en técnicas ópticas.

La luz puede ser también una herramienta para hacer investigación en un laboratorio. En este trabajo presentaremos las técnicas que se utilizan en los laboratorios de fluidos y de acústica del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

VISUALIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS

Los fluidos más comunes en la Tierra, y los más importantes para los seres vivos, son el aire y el agua. Ambos fluidos son transparentes, y no siempre se puede percibir su movimiento a simple vista. A veces se pueden ver los movimientos a gran escala, pero no se pueden distinguir los detalles. Gracias a algunos fenómenos naturales como el polvo o las nubes, o en con-

diciones muy especiales de humedad y temperatura, en que el vapor de agua del aire se condensa, se pueden ver tornados, impresionantes huracanes y los vórtices que deja un avión al despegar o que se van desprendiendo de sus alas durante el vuelo (figura 1).

Para lograr lo mismo, en el laboratorio se agregan partículas a los flujos que se quieren estudiar, con el objeto de poder visualizar los patrones que se forman en ellos y eventualmente fotografiarlos. A estas partículas se les llama *trazadores*.

Es conveniente utilizar partículas con una densidad cercana al fluido que se quiere estudiar. Si las partículas son muy pesadas o muy ligeras, se irán al fondo o a la superficie, y no podrán seguir los movimientos lentos del flujo. Sin embargo, se han visualizado muchos flujos con burbujas de aire en agua por tiempos cortos, antes de que la fuerza de flotación las desvíe hacia arriba.

Generalmente, el flujo se ilumina con una lámpara muy potente o con un láser. Para ver detalles, se puede producir una “hoja de luz” haciendo pasar la luz de un láser por una lente cilíndrica, o la luz de un proyector por una rendija.

La visualización se utiliza desde hace mucho tiempo para obtener información cualitativa de los flujos, y ha servido tanto para verificar algunos principios como para descubrir fenómenos nuevos. Últimamente, con la posibilidad de digitalizar y tratar imágenes por computadora, se ha logrado cuantificar algunos fenómenos a partir de fotografías.

La consideración más importante al estudiar un fenómeno por visualización es preguntarse cómo se relacionan los patrones reales del flujo con los patrones formados por los trazadores, es decir, qué parte del movimiento está representado en la imagen.

En mecánica de fluidos se trabaja con tres líneas imaginarias. La *línea de corriente* es siempre tangente al flujo. La *trayectoria* es la línea trazada por una partícula fluida en su movimiento. La *línea de traza* es la formada por todas las partículas que en un instante inicial pasaron por el mismo punto del espacio.

Cuando el flujo es estacionario y laminar, estas tres líneas coinciden. Cuando el movimiento es complejo, las tres líneas son diferentes.

Si se introduce una gota de tinta en un flujo y se le toma una foto con un tiempo de exposición largo, la línea dibujada será una trayectoria. Cuando se inyecta tinta o humo en un mismo punto del espacio de manera continua, la marca dejada por los trazadores es una línea de traza.



Figura 1. Los vórtices que va dejando un avión al pasar se pueden ver gracias a las nubes. (Fotografía tomada de la galería de fotos de www.efluids.com).

Es conveniente utilizar
partículas con una densidad
cercana al fluido
que se quiere estudiar



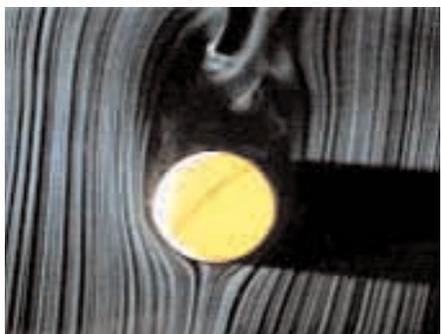
a)



b)

Figura 2. a) Flujo alrededor de un cubo. b) Flujo alrededor de un torpedo de juguete. (Fotografías tomadas por M. A. Alatorre y C. Stern en el Laboratorio de Acústica de la Facultad de Ciencias, UNAM).

En el agua
es más fácil visualizar
inyectando localmente
tinta o pintura



a)



b)

Figura 3. Visualización con humo del flujo alrededor de objetos. a) Flujo alrededor de una pelota de ping pong. b) Flujo alrededor de una pelota de golf. (Fotografías tomadas por M. A. Alatorre y C. Stern en el Laboratorio de Acústica de la Facultad de Ciencias, UNAM).

VISUALIZACIÓN POR INYECCIÓN DE TINTA O HUMO

En el aire, generalmente se visualiza usando humo. Lo más común para observar las líneas de traza es poner aceite o cera en un alambre delgado y hacer pasar una corriente suficientemente fuerte para que el producto se quemase. El aceite o cera se condensa en algunos puntos y al quemarse produce humo. El humo seguirá la trayectoria del fluido por unos instantes, y después se difundirá debido a la viscosidad.

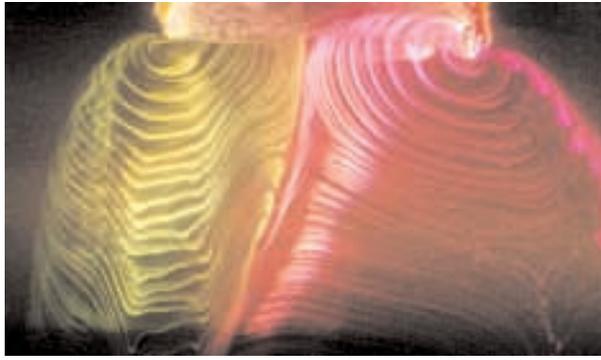
Las fotos de la figura 2 fueron tomadas para poner en evidencia el fenómeno de separación y formación de vórtices detrás de un objeto sumergido en un fluido.

La figura 2a muestra cómo se separan las líneas de corriente de la superficie de un objeto; es decir, dejando una estela como las que vemos detrás de los barcos. La figura 2b muestra en cambio cómo en un objeto aerodinámico, un torpedo de juguete, las líneas de corriente se mantienen pegadas al objeto.

La foto 3a muestra cómo se complica el fluido detrás de una pelota de ping pong: las líneas de corriente se separan aproximadamente a la mitad de la pelota, dejando una estela como la que vemos detrás de los barcos. La foto 3b muestra que en un flujo turbulento, como el que se forma alrededor de una pelota de golf, las líneas de corriente se mantienen pegadas al objeto hasta las tres cuartas partes de la pelota.

Mientras más grande sea la estela detrás de un objeto, mayor será la fuerza de arrastre que tendrá que vencer para avanzar. Al torpedo se le dio una forma aerodinámica para que las líneas de corriente se quedaran pegadas a su superficie. En cambio, la pelota de golf se fabrica especialmente rugosa para que el flujo se haga turbulento y la estela sea más angosta.

En el agua es más fácil visualizar inyectando localmente tinta o pintura. Es conveniente utilizar un sistema por gravedad,



a)



b)

como el que se usa para ponerles suero a los enfermos, para obtener un flujo continuo y controlado.

En un dispositivo de laboratorio se produjo un flujo oscilante utilizando un pistón que se mueve dentro de un tubo sumergido en un tanque de agua. Del otro lado del tubo se colocó un difusor (una trompeta). A la salida del difusor se produjeron una gran cantidad de patrones diferentes dependiendo de la amplitud y frecuencia de la oscilación del pistón. La figura 4 muestra dos de esos patrones. Cuando el pistón empuja el flujo hacia fuera se forma un vórtice, y cuando jala el fluido hacia adentro se forma otro vórtice. Según la amplitud y la frecuencia de oscilación, estos vórtices se combinan formando hermosos y variados patrones.

Figura 4. Visualización de la formación de vórtices por un flujo oscilante a través de un difusor por inyección de pintura fluorescente. (Fotografías tomadas por C. Stern, R. Godoy y S. Czitrom, Laboratorio de Fluidos, Facultad de Ciencias, UNAM; Stern *et al.*, 1999).

VISUALIZACIÓN POR PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

En agua o en algunos líquidos es muy sencillo visualizar el movimiento con partículas en suspensión. Se pueden utilizar desde algunos shampoos hasta algunas pinturas de agua tipo *gouache* metálicas, plateadas o doradas. Las fuerzas de corte, paralelas al movimiento, hacen que las partículas en suspensión se alineen al movimiento y permitan ver los patrones del flujo.

La figura 5 muestra la visualización, usando pintura plateada disuelta en agua, de un flujo oscilante a través de dos difusores diferentes. El primero es un cilindro con una terminación circular. El segundo es una trompeta con una terminación circular. El diseño de la derecha elimina totalmente la formación de vórtices.



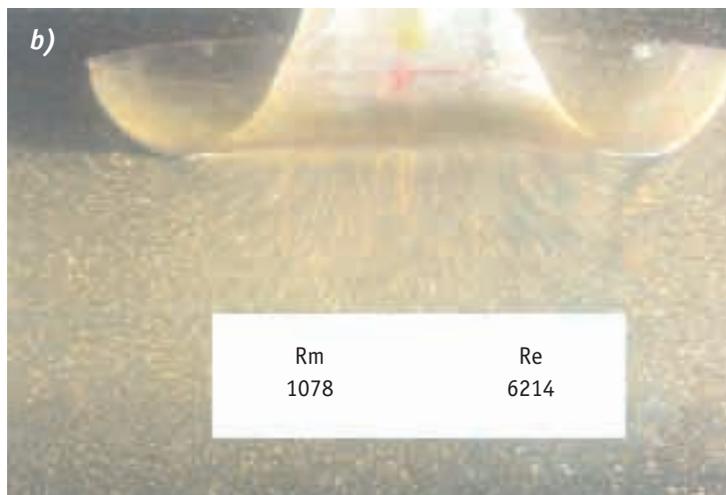


Figura 5. Visualización con pintura plateada en suspensión en agua. **a)** Muestra un flujo muy complejo abajo del difusor. **b)** Muestra un difusor abajo del cual no se forman vórtices. (Fotografías tomadas por C. Stern, R. Godoy y S. Czitrom, Laboratorio de Fluidos, Facultad de Ciencias, UNAM; Stern *et al.*, 2000).

Como nuestros ojos son más sensibles al azul que al violeta, vemos azul el cielo

VISUALIZACIÓN POR DISPERSIÓN RAYLEIGH

Si se hace incidir luz de un láser sobre moléculas de aire, éstas se excitan y forman dipolos, es decir, la carga positiva se va hacia un lado de la molécula y la negativa hacia el lado contrario. Los dipolos, al oscilar, reemiten luz de la misma frecuencia que la luz incidente. A este fenómeno de reemisión de luz por las moléculas se le llama dispersión Rayleigh.

Este fenómeno es el responsable de que veamos azul al cielo. Mientras más pequeñas son las partículas dispersoras, dispersan mejor las altas frecuencias. Por eso, cuando la luz del Sol incide sobre la atmósfera terrestre, el aire, compuesto sobre todo por nitrógeno y oxígeno, dispersa con más intensidad el azul y el violeta. Estos colores tienen las frecuencias más altas en el espectro de la luz. También dispersa el ultravioleta, pero éste es absorbido en su mayoría por el ozono de las capas altas de la atmósfera. Como nuestros ojos son más sensibles al azul que al violeta, vemos azul el cielo.

Puesto que la menor frecuencia corresponde al rojo, éste es el color que logra atravesar mejor la atmósfera. Por eso al atardecer, cuando la luz solar tiene que atravesar una distancia mayor en la atmósfera, el Sol se ve anaranjado o rojo. Cuando hay polvo o contaminantes en la atmósfera, las partículas dispersoras son más grandes y el azul del cielo se hace más claro, hasta blanquecino, o bien cambia totalmente de color.

A partir de la luz total dispersada se puede obtener información sobre los movimientos colectivos de las moléculas, es decir, sobre las variaciones de la densidad del medio iluminado. Si la luz dispersada se colecta con una lente y luego se proyecta sobre una pantalla, se obtiene una imagen del medio dispersor.

La figura 6 muestra la visualización de ondas de choque en un chorro de aire (*jet*) supersónico. Las ondas de choque son zonas de muy alta densidad (compresión) seguidas de zonas de baja densidad (rarefacción). La figura 6a muestra la primera expansión de una onda de choque formada cerca de la salida del chorro de aire, seguida de una compresión. Ambas partes se juntan en un punto formando una cruz.

Se puede formar una hoja de luz para visualizar simultáneamente varios cruces. La figura 6b muestra un arreglo en el que se presentan varios chorros supersónicos. La presión de salida aumenta de izquierda a derecha. En la parte de la extrema derecha los puntos de cruzamiento son difusos. Las fluctuaciones de densidad son tan grandes que se puede observar también parte del flujo.

La luz también
se puede utilizar
para medir cuantitativamente
la velocidad o la densidad
de los flujos

TÉCNICAS CUANTITATIVAS

La luz también se puede utilizar para medir cuantitativamente la velocidad o la densidad de los flujos. Hay dos tipos de métodos. Por un lado, se pueden digitalizar imágenes y luego analizarlas. Por otro, se puede enviar la luz dispersada a un fotodetector (detector de luz). El fotodetector convierte la luz que le llega en una corriente eléctrica. El análisis de la corriente que sale del fotodetector da información sobre la luz dispersada.

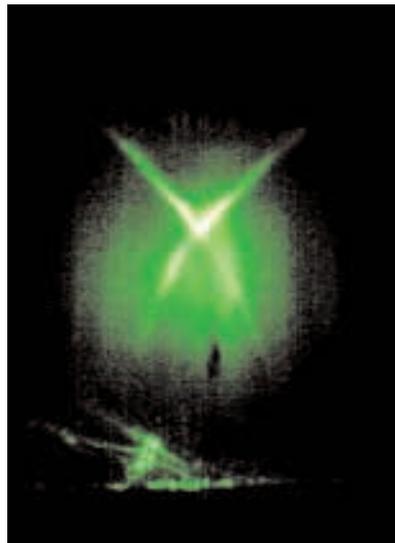


Figura 6. Ondas de choque en un jet supersónico. **a)** Muestra el primer cruce entre una onda de expansión y una de compresión. **b)** Muestra una serie de cruzamientos para cuatro chorros diferentes. (Fotografías tomadas por C. Aguilar Espinosa y C. Azpeitia Sandoval, en el laboratorio de Acústica de la Facultad de Ciencias de la UNAM).

VELOCIMETRÍA POR DESPLAZAMIENTO DOPPLER

En esta técnica se introducen primero partículas que puedan seguir al flujo. Al iluminar las partículas con una fuente de luz monocromática, como la de un láser, éstas se excitan y reemiten luz. Este fenómeno, en el que la longitud de onda de la luz es menor que el tamaño de las partículas que la dispersan, se llama dispersión de Mie.

Si las partículas se están moviendo, la frecuencia de luz que reemiten estará desplazada con respecto a la luz incidente por un factor igual al del efecto Doppler. El efecto Doppler es el que

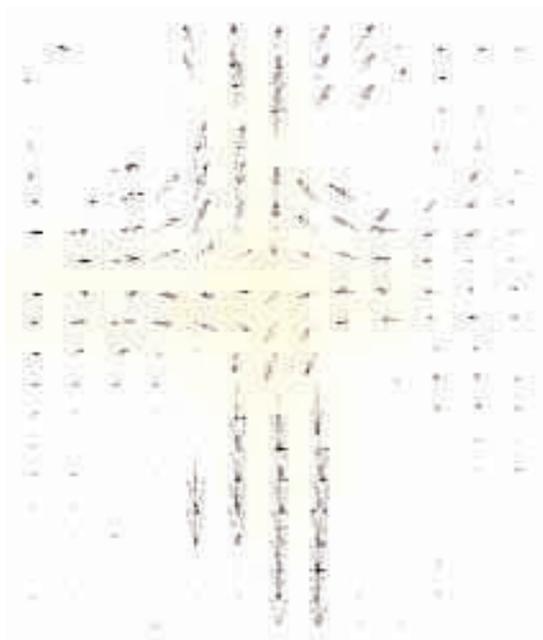


Figura 7. Campo de velocidades de un flujo oscilante saliendo de un tubo recto, obtenido a partir de la velocimetría por imágenes de partículas (Goldstein, 1996).

hace que el sonido que percibimos de una ambulancia sea más agudo (mayor frecuencia) cuando se acerca y que sea más grave (menor frecuencia) cuando se aleja, con respecto al sonido que percibiríamos de una ambulancia sin movimiento.

La medición de esta frecuencia desplazada es entonces una medición indirecta de la velocidad de la partícula (Goldstein, 1996), que suponemos es, a su vez, igual a la velocidad local del fluido. Cada vez que pase una partícula por el lugar donde está incidiendo la luz, se obtendrá un valor de la velocidad. La cantidad de partículas en el flujo debe controlarse de manera que se tenga una señal continua y que no pase más de una partícula a la vez por la zona de dispersión. Con la velocimetría por desplazamiento Doppler se obtiene la velocidad del flujo en un punto en función del tiempo.

VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS

En esta técnica también se introducen partículas en el flujo, sólo que en lugar de iluminar un punto, se ilumina con una hoja de luz. Después se toman dos fotografías del mismo plano en un pequeño intervalo de tiempo. Usando técnicas de correlación, se determina el movimiento de cada partícula en el intervalo de tiempo.

Conociendo la distancia desplazada y el tiempo entre las dos fotos, se calcula la velocidad de cada partícula en cada punto. Esta técnica permite entonces la medición del campo instantáneo de velocidades del flujo en el plano iluminado.

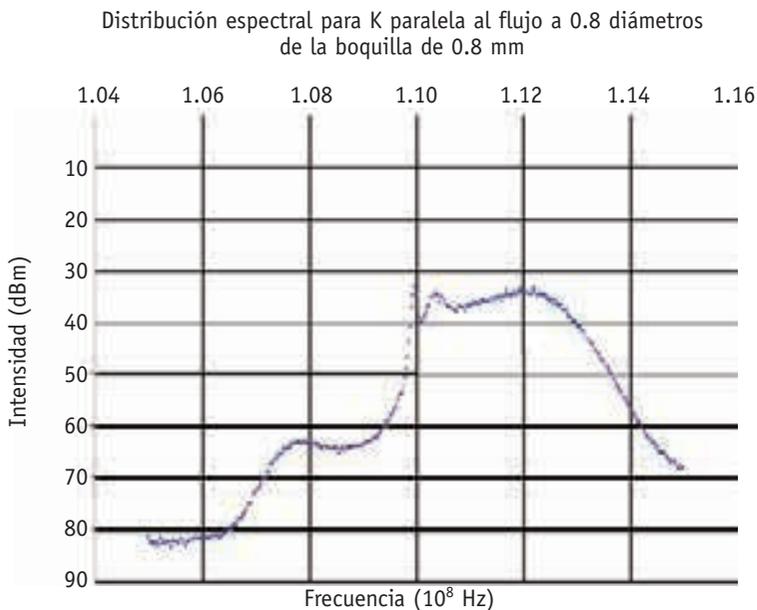


Figura 8. Densidad espectral de fluctuaciones de densidad que se propagan en la misma dirección que el chorro.

ESTUDIO CUANTITATIVO DE FLUCTUACIONES DE DENSIDAD POR DISPERSIÓN RAYLEIGH

En la dispersión Rayleigh, la luz dispersada a un ángulo particular corresponde a un tamaño particular de la fluctuación de densidad. Si en lugar de coleccionar toda la luz dispersada se recibe solamente aquella que se dispersa en una dirección particular, se puede obtener información sobre los cambios

de densidad para cada escala. Es decir, al escoger el ángulo en el que colocamos al fotodetector, estamos escogiendo el tamaño de las fluctuaciones que queremos estudiar.

La corriente que sale del fotodetector está relacionada con las fluctuaciones de densidad para una escala particular del movimiento de las moléculas en un punto del chorro. Si estudiamos el espectro de frecuencias de esa señal, obtendremos información sobre el comportamiento de la señal en el tiempo.

La densidad espectral de la figura 8 corresponde a fluctuaciones de densidad paralelas al flujo. El hecho de que el espectro no sea simétrico respecto al centro (110 megahertz, o millones de ciclos por segundo) muestra que hay una dirección privilegiada, la del chorro, hacia donde se desplazan las fluctuaciones. El pico “gordo”, que corresponde a fluctuaciones de densidad debidas a la turbulencia, se sitúa cerca de los 112 megahertz. Si se hubieran estudiado fluctuaciones perpendiculares a la dirección del flujo, el espectro sería simétrico respecto a los 110 megahertz. La diferencia entre los 110 y los 112 megahertz se debe a un efecto Doppler. Si la velocidad del flujo es menor a la del sonido, podemos utilizar las relaciones conocidas entre la velocidad y el cambio de frecuencia para determinar la velocidad del chorro en el punto de la dispersión. En este experimento, la velocidad del chorro se vuelve subsónica a una distancia aproximadamente igual a 13 veces el diámetro. El “pico” relativamente pequeño, que se ve cerca de los 1.08 megahertz muestra fluctuaciones de origen acústico. Esto se puede determinar gracias a que conocemos la frecuencia (v) y longitud de onda (λ) y sabemos que $v_{\text{sonido}} = \lambda v$.

Finalmente, el pico cercano a 11.4 megahertz parece corresponder a la parte de una onda de choque en la que se encuentran la primera onda de expansión con la primera de compresión (figura 6a).

CONCLUSIONES

Es interesante constatar que actualmente un investigador experimental requiere de conocimientos de óptica para trabajar en temas tan diferentes como la mecánica de fluidos, la acústica o las telecomunicaciones.

Con el advenimiento del láser y la posibilidad de tener luz monocromática estable de alta intensidad, que además se puede concentrar en un punto, se han desarrollado gran cantidad de nuevas técnicas ópticas que se utilizan en todas las áreas de la física. En particular, la última técnica descrita aquí puede servir como velocímetro, como densitómetro y como micrófono no intrusivo. Se espera poder localizar las fuentes de emisión aeroacústica, es decir, las fuentes de sonido debidas al movi-

miento de fluidos. Actualmente se desconoce el lugar exacto en que se produce el sonido y el evento dinámico que lo produce. Solamente se podrá controlar la emisión acústica si se sabe exactamente cómo se produce.

Bibliografía

- Czitrom S., Godoy R, Prado E., Olvera A., Peralta y Fabi R. y Stern C. (2000), “Hydrodynamics of an Oscillating Water Column Seawater Pump, Part II: Tuning to Monochromatic Waves”, *Ocean Engineering*, 27, págs. 1199-1219.
- Goldstein, R. J. (editor) (1996), *Fluid Mechanics Measurements*, segunda edición, Taylor and Francis, EUA.
- Stern, C., S. P. R. Czitrom, E. Prado y R. Godoy (2000), “Supresión de vórtices en un flujo oscilante a través de un difusor”, *Revista Mexicana de Física*, 47 págs. 409-410, sección especial “Galería de Fluidos”.
- Stern, C., S. P. R. Czitrom y R. Godoy (1999), “Oscillating Flow through a Funnel”, *Physics of Fluids*, 11, S3.

Catalina Stern estudió la licenciatura en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el doctorado de tercer ciclo en la Universidad de París XI y el doctorado en la Universidad de Houston. Es profesora del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Ha sido profesora en la Universidad de Houston y en la Universidad Nacional de Costa de Marfil. Hace trabajo experimental en fluidos, en temas como estabilidad no lineal, turbulencia, etcétera, y en el desarrollo de nuevas técnicas ópticas y acústicas para el estudio de los fluidos.
catalina@graef.fciencias.unam.mx