

Caracterización del movimiento de partículas micrométricas en medio viscoso mediante pinzas ópticas

Caruso Marcos, Veliz Leonardo, Juan Gamboa

marcosarielcaruso@gmail.com, leonardovelizc3220@gmail.com, Juangamboabareiro@gmail.com

Laboratorio de Física Avanzada, Departamento de Física, FCEN, UBA 2025

Resumen

En ciertas áreas de la ciencia, como la biología, se busca caracterizar el movimiento de partículas muy pequeñas sumergidas en alguna solución. Las pinzas ópticas son una herramienta que cumple de forma satisfactoria con este propósito, dando la posibilidad de atrapar partículas de la muestra haciendo uso de un diodo láser. En este trabajo, se utilizaron pinzas ópticas para caracterizar el movimiento de micro partículas de látex sumergidas en un medio viscoso. A partir del desplazamiento cuadrático medio (MSD) se calculó la viscosidad η de 4 soluciones de agua y glicerina, siendo los resultados: $\eta_1 = (2.53 \pm 0.02)mPa.s$, $\eta_2 = (5.22 \pm 0.05)mPa.s$, $\eta_3 = (6.36 \pm 0.06)mPa.s$ y $\eta_4 = (1.81 \pm 0.01)mPa.s$ para concentraciones de 10 %, 15 %, 20 % y 25 % de glicerina respectivamente. Se concluyó que la última muestra no tiene la concentración asumida, debido a su bajo valor de viscosidad. Se calculó el radio de confinamiento de la trampa óptica en función de la potencia del haz incidente. Se vio que el radio decrece a medida que aumenta la potencia. Por último, se caracterizó la efectividad de la trampa óptica, mostrando que la fuerza de retención máxima aumenta junto con la viscosidad del medio.

1. Introducción

En muchas áreas de la ciencia, es importante caracterizar el movimiento de partículas de tamaños muy pequeños, sumergidas en un medio viscoso. El movimiento de estas partículas se puede considerar una *caminata aleatoria*.. Este término describe una partícula que en un intervalo de tiempo regular se mueve una longitud fija en un ángulo aleatorio. Al cabo de cierto tiempo, se puede construir una distribución de probabilidad para el movimiento de la partícula.

1.1. Pinzas Ópticas

Las pinzas ópticas son una herramienta que permite caracterizar el movimiento de partículas del orden micrométrico, como por ejemplo células, bacterias y proteínas. La utilidad de esta herramienta se encuentra en la posibilidad de confinar estas partículas en un lugar del espacio gracias a un láser con perfil de intensidad gaussiano. Se suele asumir que las partículas que se intentan atrapar son de un material dieléctrico, lineal, isótropo y espacial y temporalmente no dispersivo.

Cuando una partícula se encuentra cerca o en la

misma ubicación que el foco del láser, esta se halla bajo el efecto de sus fuerzas. Una componente, la fuerza de scattering, actúa a lo largo de la dirección de propagación del haz, mientras que la otra actúa a lo largo del gradiente de intensidad y, por lo tanto, se denomina fuerza de gradiente, la cual puede actuar en diferentes direcciones con respecto a la partícula. Solo se obtiene un confinamiento estable si la fuerza del gradiente, que atrae al objeto en la dirección del foco, es mayor que la fuerza de scattering, que empuja a la partícula en la dirección del haz, alejándola del foco. Esto se puede visualizar en la figura 1.

Se pueden analizar distintos casos de la interacción entre la fuerza del haz con la partícula, los cuales se distinguen según la relación entre el radio de la partícula R y la longitud de onda del láser λ . En este trabajo nos centramos en el caso del Régimen de Mie, en donde $R \gg \lambda$, al menos por un orden de magnitud. [1]

1.2. Movimiento Browniano

En 1905, Einstein publicó su trabajo sobre *movimiento Browniano*, que describe el movimiento de una partícula pesada rodeada de un gas [2] a partir de una caminata aleatoria. Para caracterizar este

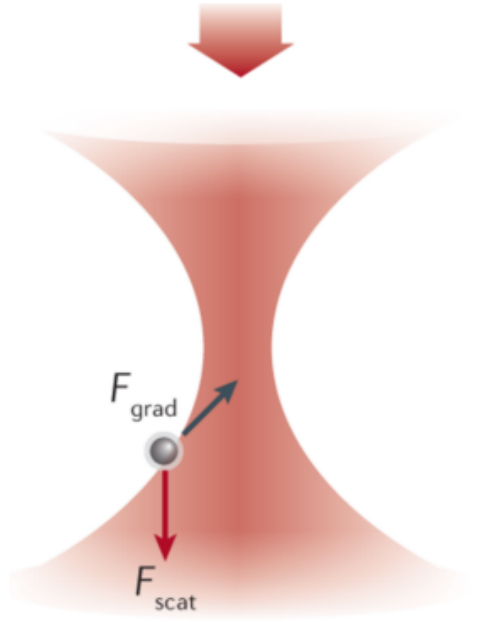


Figura 1: Esquema de un haz gaussiano atrapando una partícula (la esfera gris). La fuerza gradiente F_{grad} apunta hacia el foco del haz, mientras que la fuerza de scattering F_{scat} apunta en la dirección incidente del láser.

tipo de movimiento, una opción es calcular el desplazamiento cuadrático medio (MSD, por sus siglas en ingles), que se define de la siguiente manera [3]:

$$msd(\tau) = \frac{1}{N - (\tau - 1)} \sum_{i=1}^{N-(\tau-1)} (x_{i+\tau} - x_i)^2 \quad (1)$$

donde x_i son las posiciones que fue tomando la partícula, τ es lo que se denomina "tiempo de retraso" y es la variable de la cual depende el MSD, y N es el número total de pasos de la trayectoria, es decir, su duración.

En este trabajo, nos interesará analizar caminatas aleatorias que presenten *deriva*, es decir, que estén siendo arrastradas por el medio en una dirección particular. Haremos uso de las siguientes expresiones analíticas para describir el MSD [4]:

$$\begin{aligned} msd(t) &= 2dDt && \text{para mov. libre,} \\ msd(t) &= 2dDt + (\nu t)^2 && \text{para mov. con deriva.} \end{aligned} \quad (2)$$

donde d es el número de dimensiones en las que se produce el movimiento, D el coeficiente de difusión del medio y ν es la velocidad de deriva. Se puede ver que si la velocidad de deriva es nula, recuperamos el movimiento libre. El coeficiente de difusión D también puede ser expresado como:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R} \quad (3)$$

donde η es la viscosidad del medio, R es el radio de la partícula, k_B es la constante de Boltzmann y T es la temperatura de la partícula.

También se utilizará la siguiente expresión para el MSD en el caso de una partícula confinada en alguna región del espacio [4]:

$$msd(t) = R_0^2 (1 - A_1 \exp \left[-\frac{2dA_2 t}{R_0^2} \right]) \quad (4)$$

donde A_1 y A_2 son constantes de ajuste y R_0 es lo que llamamos radio de confinamiento.

Por último, nos interesa cuantificar la efectividad de la trampa óptica, a través de calcular la fuerza máxima de retención F_{max} . Para ello consideramos que para una partícula aislada que se mueve dentro de un fluido, la única fuerza sobre ella es la fuerza viscosa F_{vis} . Si atrapamos esta partícula con un láser y se le aplica una aceleración conocida, en el instante en que se suelte, la fuerza máxima de retención será igual a la fuerza viscosa. Luego, para una pequeña partícula esférica dentro de una solución vale la siguiente ecuación

$$F_{vis} = F_{max} = 6\pi\eta R v_{max} \quad (5)$$

donde R es el radio de la esfera, η es la viscosidad del medio que mencionamos antes y v_{max} es la velocidad que toma a la partícula en el instante en el que se desprende de la trampa, la cual se denomina *velocidad de escape*.

En este trabajo se observaron partículas de látex sumergidas en una mezcla de agua destilada y glicerina con diferentes concentraciones. Se buscó utilizar el método de pinzas ópticas para medir la posición de las partículas en función del tiempo y así poder calcular su MSD. A partir de esto, se buscó calcular la viscosidad del medio para distintas concentraciones de agua y glicerina a través de la ecuación 3. También se utilizaron pinzas ópticas para atrapar partículas con el láser, y así poder calcular el radio de confinamiento a través de la ecuación 4. Otro de los objetivos es calcular este radio de confinamiento en función de la potencia del láser, que fue regulado con una fuente externa. Por último, se calculó la velocidad de escape de varias partículas para lograr obtener la fuerza máxima de retención de la trampa óptica, a través de la ecuación 5.

2. Desarrollo experimental

Se utilizó un kit de pinzas ópticas portable EDU-OT1/M de Thor Labs, como se ve en la figura 2. Los elementos mas importantes de este kit son; un diodo láser de longitud de onda de $\lambda = (659, 27 \pm 5, 11)nm$ (medido con un espectrometro CCS200/M) y una potencia máxima de $P = (13.21 \pm 0.75)mW$ (medido con un powermeter PM16-130) y una cámara ensamblada con un microscopio que se utilizaron para observar las muestras de látex, agua y glicerina. Para lograr enfocar el haz incidente en la muestra, se necesitan de varios elementos ópticos que se pueden observar en la figura 2 pero que no son mencionados, ya que necesitan una alineación muy especifica. Para mas detalles consultar el manual [5].

El kit de pinzas incluye 2 servos que se pueden manipular desde la aplicación *Thorlabs Kinesis software*, los cuales son necesarios a la hora de mover la muestra para atrapar las partículas deseadas.

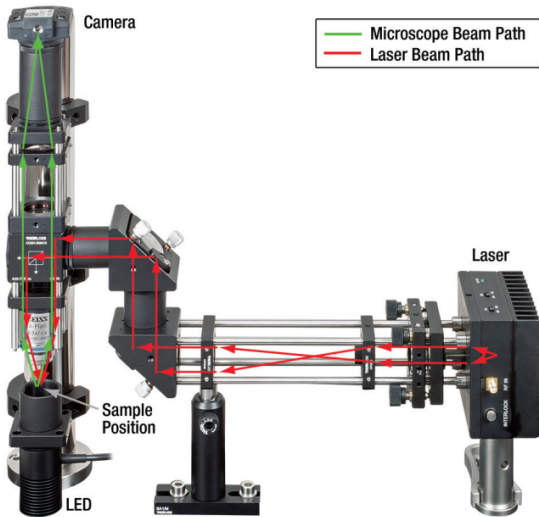


Figura 2: Configuración experimental de pinzas ópticas utilizada. Se muestran los objetos mas importantes; el diodo láser, la cámara (que esta junto al microscopio), el posicionamiento de la muestra y un LED que se utiliza para mejorar la iluminación.

Las muestras utilizadas se encuentran sobre una placa de vidrio llamada *portaobjetos* y cubiertas por un pequeño *cubreobjetos*, los cuales fueron esterilizados previamente a cada medición. Es importante recalcar que, para atrapar partículas, buscamos que la muestra y el foco del láser se encuentren a la misma altura, ya que de otra forma no tendremos trampa óptica. En la figura 3 se ven 3 focos del láser (causados por reflexiones); los primeros 2 focos se encuentran en las partes superior e inferior del cubreobjetos,

mientras que el tercer foco se encuentra en la muestra. Este último foco es el que nos interesa, ya que es el que puede atrapar las partículas de látex.

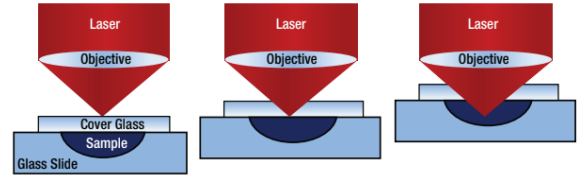


Figura 3: Visualización de los 3 focos del láser.

En la figura 4 se ve una de las muestras que se utilizaron. Para cada muestra, se colocaron $15\mu l$ de mezcla en el portaobjetos y se la observó con el microscopio. El radio de las microesferas de látex es de $(2, 41 \pm 0, 29)\mu m$. El movimiento de las partículas fue estudiado mediante el uso del software *Tracker* y para su posterior análisis se empleó una calibración pixel-micrómetro obtenida a partir de una grilla con mínima apreciación de $10\mu m$. Con la calibración utilizada, la equivalencia a pixeles es $1\mu m \approx 8, 52 \text{ pixeles}$. Para el análisis de las partículas se promedió el movimiento de aproximadamente 10 de estas por video, cada uno de una duración de alrededor de 1 minuto. A partir de estas mediciones se busca calcular el MSD y posteriormente la viscosidad del medio.

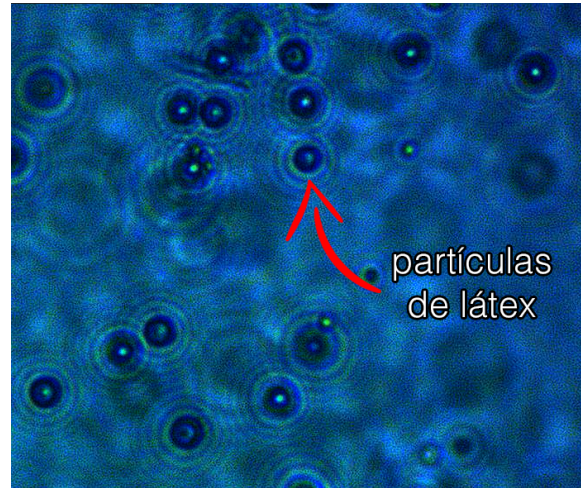


Figura 4: Partículas de látex sumergidas en una mezcla de glicerina 20% y agua destilada 80% observadas bajo el microscopio.

Para calcular el radio de confinamiento, se activó el láser y se lo acercó lo suficiente a una partícula de látex hasta que esta quedara atrapada. Luego se procedió a grabar y se calculó el MSD de la misma forma que para las partículas libres, solo que ahora

se ajusto por la ecuación 4. Se repitió este proceso varias veces mientras se variaba la potencia del láser con una fuente externa.

Para calcular la velocidad de escape, se atrapó una partícula nuevamente con el láser, y se procedió a moverla utilizando los servos. Se arrastró la partícula hasta que esta se soltó, y se siguió ese movimiento con el *Tracker* para calcular la velocidad con la que lo hizo. Se consideraron otras 5 partículas de alrededor para cada muestra debido a que, al estar en el mismo sistema de referencia que el láser, la partícula atrapada no se desplaza. Por ello, se consideran las velocidades de las partículas vecinas y se toma la velocidad máxima como el promedio de las velocidades de estas partículas en el momento en que la partícula atrapada se suelta de la pinza, es decir, cambia su velocidad.

Las concentraciones de las muestras analizadas son las siguientes (todas contienen partículas de látex):

Concentración en porcentajes		
Muestras	Glicerina	Agua destilada
Muestra 1	10	90
Muestra 2	15	85
Muestra 3	20	80
Muestra 4	25	75

Cuadro 1: Concentración de la solución para cada muestra utilizada

3. Análisis de datos y resultados

3.1. Caracterización del movimiento

En primer lugar, se busca caracterizar si el tipo de movimiento obtenido es browniano libre o con deriva. Siendo así que, se adquirieron las trayectorias de las distintas partículas usando el *Tracker*, viéndose en la figura 5 con un desplazamiento privilegiado.

En la figura 6, se observa que el valor medio de las trayectorias, así como el promedio, evoluciona de manera lineal en el tiempo, lo cual es característico de un movimiento con deriva, así también vemos que aumenta la dispersión en el tiempo. Se realizó un ajuste lineal sobre el promedio de las trayectorias, donde se obtuvieron las velocidades de deriva para las distintas muestras.

Para obtener el valor del coeficiente de difusión, fue necesario restar la deriva de cada trayectoria. Luego, se calculo el MSD para cada partícula considerando los tiempos de retraso τ de 3 a 10. En la figura 7 se

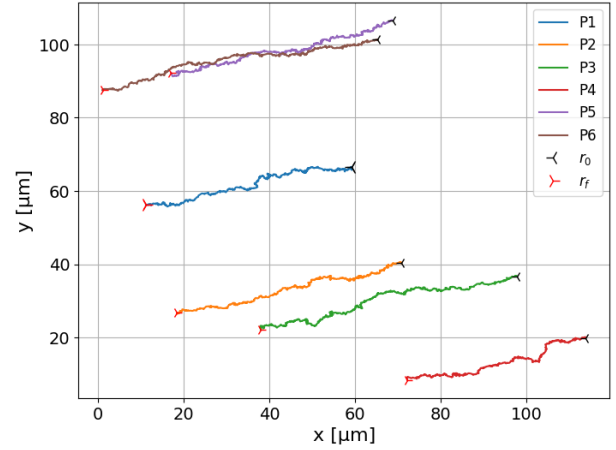


Figura 5: Trayectoria de partículas de látex en el plano xy de la muestra de 10 % glicerina. Observamos que presentan una deriva pronunciada en el eje x

muestra el MSD en función del tiempo para el caso de $\tau = 3$. Sobre cada τ se calculo el MSD promedio y se realizó un ajuste siguiendo la expresión 2, donde se obtuvo un valor de D según cada τ . Realizando el promedio de los valores obtenidos, se obtuvieron los valores de D para las distintas muestras.

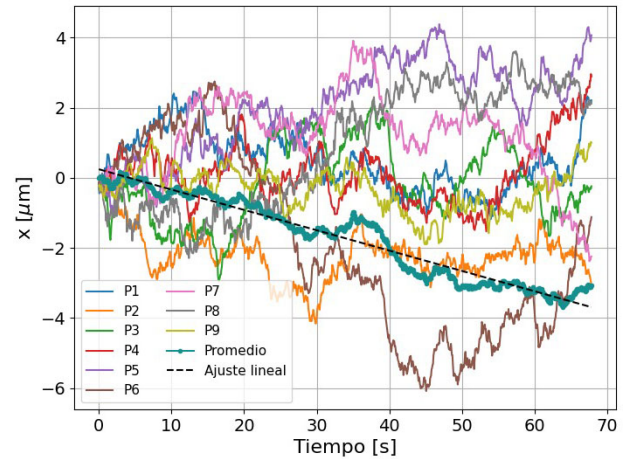


Figura 6: Trayectoria de las partículas de la muestra de 15% glicerina (9 en total; P1, P2... etc) en función del tiempo, junto con el ajuste y el promedio.

A través de la ecuación 3 se calculó la viscosidad utilizando el MSD de cada partícula. Luego, se promediaron estos valores para obtener la viscosidad de cada muestra.

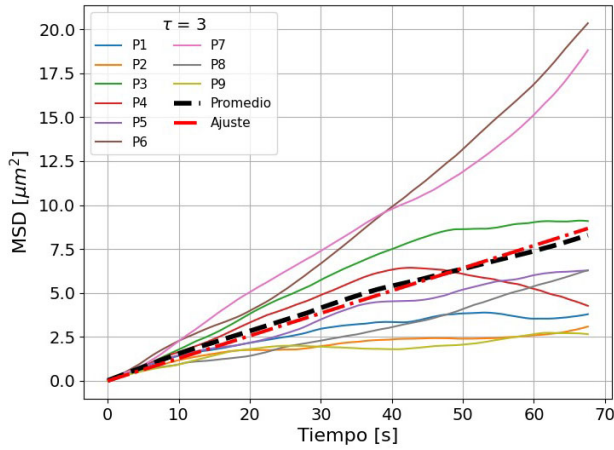


Figura 7: MSD de las partículas (9 en total; P1, P2... etc) en función del tiempo para el caso $\tau = 3$, junto con el ajuste y el promedio.

Valores obtenidos de D , η para # de muestra		
#	Valor D	Valor η
1	$(4.17 \pm 0.03)10^{-2} \frac{\mu m^2}{s}$	$(2.53 \pm 0.02)mPa \cdot s$
2	$(1.84 \pm 0.01)10^{-2} \frac{\mu m^2}{s}$	$(5.22 \pm 0.05)mPa \cdot s$
3	$(1.47 \pm 0.01)10^{-2} \frac{\mu m^2}{s}$	$(6.36 \pm 0.06)mPa \cdot s$
4	$(4.75 \pm 0.05)10^{-2} \frac{\mu m^2}{s}$	$(1.81 \pm 0.01)mPa \cdot s$

Cuadro 2: Valores obtenidos de D y η para cada muestra.

Se puede observar que el valor de la viscosidad disminuye al pasar de la muestra con 20 % glicerina a la que tiene 25 %, a pesar de que se espera que el valor aumente. Esto probablemente se deba a que hubo errores en la preparación de la muestra de 25 % y no tiene realmente esa concentración de glicerina.

3.2. Radio de confinamiento

Para obtener el radio de confinamiento, al igual que en la sección anterior, se calculó el MSD restando las velocidades de deriva promedio y considerando tiempos de retraso τ de 3 a 10 a una dada potencia. En este caso, sobre el MSD promedio para cada τ , se realizó un ajuste siguiendo la expresión 4, obteniendo el valor del radio de confinamiento en función de τ . Por último, se promediaron estos valores para calcular los radios de confinamiento para cada muestra a una dada potencia. Se repitió este procedimiento para distintos valores de potencia, pero solo para las muestras de 15 % y 20 % glicerina, como se muestra

en la figura 8.

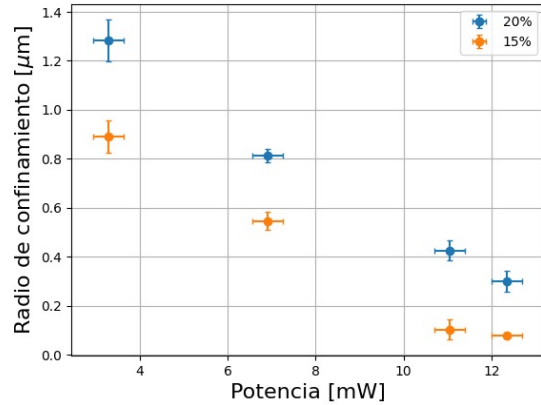


Figura 8: Radio de confinamiento de la partícula en función de la potencia del haz incidente, para una mezcla de 15 % glicerina y 85 % agua en naranja, y 20 % glicerina y 80 % agua en azul.

Se puede observar que la potencia del haz influye en gran medida en el atrapado de las partículas, ya que el radio de confinamiento disminuye, logrando una menor dispersión en el desplazamiento a mayor potencia.

3.3. Efectividad de la trampa óptica

En la figura 9 se muestra el valor de la fuerza de retención máxima de la trampa óptica en función de la viscosidad, es decir que cada punto es una muestra diferente.

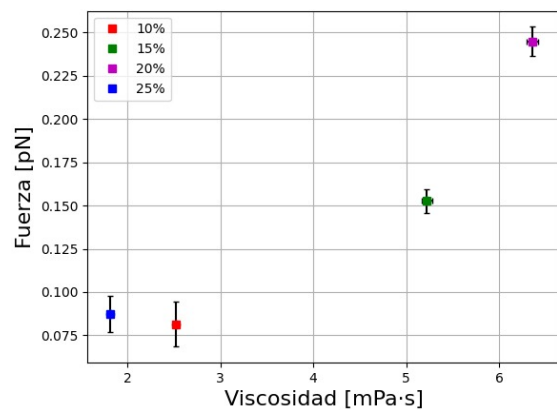


Figura 9: Valor de la fuerza de retención máxima de la trampa óptica en función de la viscosidad de la muestra. Se indica el porcentaje de glicerina de cada muestra.

Se puede ver que al primer punto, que en teoría corresponde a una concentración de 25 % de glicerina, le corresponde una viscosidad y un valor de la fuerza de escape que nos podría indicar que la muestra en realidad tiene un porcentaje de glicerina de alrededor del 10 %.

4. Conclusión

Se logró medir la posición en función del tiempo de muchas micro partículas de látex sumergidas en una solución de glicerina y agua destilada, utilizando la herramienta de pinzas ópticas. Con esto se calculó el MSD y se obtuvo el valor de la viscosidad de 4 mezclas de agua y glicerina con diferentes concentraciones, siendo estos valores:

$\eta_1 = (2.53 \pm 0.02)mPa \cdot s$ para una concentración de 10 % de glicerina y 90 % agua,

$\eta_2 = (5.22 \pm 0.05)mPa \cdot s$ para una concentración de 15 % de glicerina y 85 % agua,

$\eta_3 = (6.36 \pm 0.06)mPa \cdot s$ para una concentración de 20 % de glicerina y 80 % agua y

$\eta_4 = (1.81 \pm 0.01)mPa \cdot s$ para una concentración de 25 % de glicerina y 75 % agua.

El valor obtenido para la mezcla de 25 % es bastante mas bajo de lo esperado (se espera que aumente a medida que sube la concentración), por lo que se estima que esta muestra se armó de forma incorrecta y no lleva la concentración que se estaba asumiendo.

Al atrapar partículas de látex con un haz incidente, se logró calcular el radio de confinamiento en función de la potencia emitida por el láser. Se observó que este radio de confinamiento se vuelve cada vez mas chico a medida que aumenta la potencia del haz incidente.

Por último, se logró calcular la fuerza de retención máxima de la trampa óptica para cada mezcla utilizada. Se observó que, a medida que aumenta la viscosidad del medio, aumenta la fuerza de la trampa óptica.

5. Agradecimientos

¡Al grupo 4 del turno mañana por recibirnos todos los días con el láser de pinzas ópticas alineado!

Marco García, David Sartor y Sofia Martinez.

6. Aspiraciones

Durante el trabajo nos comentaron que se puede agregarle momento angular orbital a la partícula mediante haces de luz estructurados con modos tipo La-

guerre Gauss (haz tipo dona), logrando mayor eficiencia en la maniobrabilidad de las partículas, en atrapar y rotar, queda como trabajo para un futuro la caracterización de este fenómeno, así como la de la red de difracción tipo fork que se usa o la producción de esta [6].

Así también se podría mejorar la eficiencia del atrapado mediante otorgarle al haz una polarización circular o mejorando la apertura numérica del objetivo.

Referencias

- [1] ASHKIN A., *Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime.*, In: Biophys. J. 61 (1992) 2, 569-582 (Link)
- [2] BROWN, R. (1829), *XXIV. Additional Remarks On Active Molecules*, Philosophical Magazine Series 2, 6(33):161-166.
- [3] AUGUSTO A. KIELBOWICZ VALAREZO (2017), *Análisis estadístico y modelado numérico de trayectorias de partícula única: mecanismos de difusión y confinamiento*, Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas FCEN, UBA.
- [4] CODLING, E. AND HILL, N. (2005)., *Sampling rate effects on measurements of correlated and biased random walks.*, Journal of Theoretical Biology, 233(4):573-588.
- [5] THOR LABS, *EDU-OT1/M Portable Optical Tweezers* (Link)
- [6] LUCAS VARELA AND SEBASTIAN SANABRIA (2015), *Producción de modos Laguerre Gauss* (Link)