

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE TULANCINGO

MAESTRÍA EN COMPUTACIÓN ÓPTICA



**MANIPULACIÓN MASIVA DE MICROPARTÍCULAS  
DIELÉCTRICAS Y METÁLICAS A TRAVÉS DE FENÓMENOS  
TERMO Y FOTOFORÉTICOS.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN COMPUTACIÓN ÓPTICA

PRESENTA

**ING. ANA ROSA CRUZ GARRIDO**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. JOSÉ GABRIEL ORTEGA MENDOZA**

TULANCINGO, HIDALGO, MÉXICO

OCTUBRE, 2020

## DEDICATORIA

*A mis padres, Noelia y Amado:*

*Porque las enseñanzas que me han brindado desde la infancia son la inmutable saeta que me ayuda a conducirme por la vida, mientras que su apoyo incondicional durante mi formación académica es la piedra angular de la vida profesional que estoy construyendo.*

*A mi abuelita, Rosa:*

*Porque me ha demostrado con su ejemplo, que la fortaleza y la tenacidad son cualidades imprescindibles en el arquetipo de la mujer emancipada, modelo que estoy aprendiendo a forjar en mí gracias a su sabio consejo.*

*A mi tía, Engracia:*

*Porque su nobleza y gentileza son un recordatorio de las virtudes de mi madre y me han facilitado confort y calidez en momentos difíciles.*

# Agradecimientos

A mi asesor, el Dr. José Gabriel Ortega Mendoza, pues su experiencia como investigador, en conjunto con su mente brillante e innovadora, hizo posible la concepción de este trabajo. Igualmente agradezco sus valiosas observaciones y dedicación durante el desarrollo de los experimentos y la escritura de la tesis, ya que sin ellas, esta investigación no se habría materializado.

A la Universidad Politécnica de Tulancingo, por brindarme la oportunidad de estudiar la Maestría en Computación Óptica y por poner a mi disposición los materiales e instalaciones necesarias para realizar la investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de posgrado.

A mis revisores de tesis y sinodales, la Dra. Carina Toxqui Quitl, el Dr. César Joel Camacho Bello y el Dr. Alfonso Padilla Vivanco, ya que cordialmente invirtieron su tiempo en evaluar este trabajo y además me ayudaron a mejorarlo mediante sus oportunas sugerencias.

# Resumen

En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre el movimiento masivo de micropartículas dieléctricas y metálicas suspendidas en un medio acuoso. Para ello se utilizaron dos suspensiones con partículas dieléctricas y una con partículas metálicas. Las dos primeras se crean al mezclar agua destilada con partículas de poliestireno de látex (PS) de 3  $\mu\text{m}$  y al combinar agua destilada con partículas de PS de 1  $\mu\text{m}$ . La última, en cambio resulta de mezclar agua destilada con partículas de plata de 1  $\mu\text{m}$ . Para ocasionar el desplazamiento de las partículas dieléctricas se originó un gradiente de temperatura por medio de la conversión luz-calor suscitada en la cara fotodepositada de una fibra óptica. Por otro lado, el desplazamiento de las partículas metálicas ocurrió al iluminarlas con la luz propagada dentro de una fibra óptica sin fotodepositar. La luz empleada tanto en los experimentos con partículas dieléctricas como en los experimentos con partículas metálicas fue generada por una fuente láser de estado sólido con salida a fibra óptica, que emite radiación con longitud de onda de 455 nm (luz azul).

La manipulación de micropartículas dieléctricas ocurrió gracias a que se integraron nanopartículas de plata (menores de 100 nm) en la punta de la fibra óptica por medio de la técnica de fotodeposición. Esta punta con nanopartículas se insertó en el canal de una celda transparente de vidrio donde se contiene la suspensión a estudiar. Cuando la luz de la fuente impacta a las nanopartículas de plata, estas absorben la radiación y la transforman en calor, el cual se difunde de forma no uniforme en el medio circundante, dando paso a la termoforesis. Esta situación es la causante del movimiento en las partículas dieléctricas. Para cuantificar la magnitud de la fotodeposición se aprovechó el hecho de que, a mayor número de partículas adheridas en la cara de la fibra óptica, menor debe ser la intensidad luminosa que logra salir de la fibra pues hay un bloqueo de luz, lo que se ve reflejado como una atenuación en la potencia óptica (medida en dB). La manipulación de partículas metálicas, en cambio, no requiere aplicar la técnica de fotodeposición debido a que la plata es un fuerte absorbente de la luz azul. Así pues, la ejecución de estos experimentos solo consiste en colocar la punta de la fibra óptica en el canal de la celda transparente que contiene la suspensión de micropartículas e irradiar las partículas con la fuente. En este caso, los mecanismos responsables de la moción son derivados de la conversión luz-calor que ocurre en las partículas y la difusión de este calor hacia el medio huésped. Dado que no se conoce a ciencia cierta lo que causa la moción, se adjudican tres posibles mecanismos a ésta: la termoforesis, la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  y la fotoforesis indirecta.

Gracias a los experimentos, fue posible observar que las micropartículas de PS experimentan una moción dirigida hacia la punta de la fibra y que la velocidad de

movimiento incrementa mientras mayor sea la pérdida de potencia obtenida durante la fotodeposición.

Los experimentos realizados con micropartículas de plata revelaron que la luz láser de color azul es capaz de mover a estas partículas ya sea a favor o en contra de la dirección de propagación del haz. Cuando se mueven a favor, las partículas se acumulan en grandes cantidades a distancias relativamente largas con respecto de la fibra, mientras que, cuando viajan en contra, éstas se acumulan en la vecindad de la fibra óptica. Adicionalmente, se observó que la velocidad experimentada por las partículas y la rapidez de su aglomeración depende de qué tan grande sea la potencia de operación del láser.

Las técnicas de manipulación ejecutadas y estudiadas en esta tesis pueden aplicarse para purificar algún líquido, especialmente agua, al concentrar los contaminantes en zonas estratégicas de donde, posteriormente podrán ser extraídos.

# Abstract

This work presents an experimental study about the movement induced over dielectric and metallic microparticles by illuminating them with electromagnetic energy that comes from a solid state laser source with fiber optic output. The laser source emits radiation with a wavelength of 455 nm (blue light). Three suspensions were used. They were made by mixing distilled water with 3  $\mu\text{m}$  latex polystyrene (PS) particles, distilled water with 1  $\mu\text{m}$  PS particles and distilled water with 1  $\mu\text{m}$  silver particles. To generate a motion of the particles under study, it is required to take advantage of phenomena like the absorption of light by the molecules of a special material, in this case silver nanoparticles were used, its consequent transformation to heat and, finally, the diffusion of that heat inside and in out of the particle.

Dielectric microparticles manipulation occurred because of the integration of silver nanoparticles (lesser than 100 nm in size) in the fiber optic tip employing the photodeposition technique. This photodeposited tip was inserted inside the channel of a transparent glass cell where the suspension of interest is contained. When the light from the laser source hits the silver nanoparticles, they absorb radiation and transform it to heat, which diffuses non-uniformly in the host medium, rising thermophoresis. This situation causes the motion of dielectric particles. To quantify the magnitude of photodeposition, the next reasoning was done: as long as the number of particles adhered into fiber optic increases, the intensity of upcoming light will decrease because of a blocking of it, which is present as an attenuation of optical power (measured in dB).

Manipulation of metallic particles, on the other hand, does not require to apply the photodeposition technique because silver is a strong absorbent of blue light. So, the execution of these experiments only consists of putting the fiber optic tip inside the channel of transparent cell, which contains the microparticles suspension and then, illuminate the particles with the source. In this case, the responsible mechanisms of motion are product of the light-heat conversion that happens in the particles and the diffusion of this heat towards the host medium. Like the real causes of motion are yet unknown, three hypothesis were proposed to give a possible explanation: movement induced by thermophoresis, by  $\Delta\alpha$ -type photophoresis and/or by indirect photophoresis.

Due to the experiments, it was possible to observe that PS microparticles experiment a motion directed towards the fiber tip and that the movement's velocity increases as the power loss gotten after photodeposition is bigger.

The experiments done with silver microparticles revealed that blue laser light is able to move these particles, whether towards or against the direction of light propagation. When moving towards, the particles get together in big quantities and to relatively long

distances respect to the fiber optic while, when traveling against, they accumulate in the vicinity of fiber optic. Besides, it was observed that the experienced velocity by particles and the agglomeration rate depends of how big the operation laser power is.

The executed and studied manipulation techniques in this thesis can be applied to purify some liquid, especially water, by concentrate the pollution in strategic zones from were, then it will be extracted.

# Índice general

<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	21
<b>1.1. Técnicas de atrapamiento</b> .....	22
1.1.1. Atrapamiento acústico .....	22
1.1.2. Atrapamiento con pinzas magnéticas .....	23
1.1.3. Atrapamiento basado en fuerza óptica. ....	24
1.1.4. Atrapamiento basado en el efecto fototérmico.....	25
<b>1.2. Antecedentes</b> .....	26
1.2.1. Uso de micro/nano fibras para incrementar la radiación de la fuente. .26	
1.2.2. Uso de materiales especiales para aumentar la absorción de la luz.....27	
1.2.3. Aumento de esparcimiento de la luz mediante anillo de fibra óptica....28	
<b>1.3. Objetivo general</b> .....	29
<b>1.4. Objetivos particulares</b> .....	29
<b>1.5. Estructura del trabajo de tesis</b> .....	29
<b>Capítulo 2: Marco teórico</b> .....	30
<b>2.1. Reflexión de la luz</b> .....	30
<b>2.2. Absorción de la luz</b> .....	31
<b>2.3. Transmisión de la luz</b> .....	33
<b>2.4. Propagación de la luz en la fibra óptica</b> .....	34
<b>2.5. Presión de radiación</b> .....	36
<b>2.6. Termoforesis</b> .....	37
<b>2.7. Fotoforesis</b> .....	39
2.7.1. Fotoforesis directa .....	39
2.7.2 Fotoforesis indirecta.....	40
<b>Capítulo 3: Desarrollo experimental</b> .....	45



<b>3.1. Migración de partículas dieléctricas.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.1. Fotodeposición.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2. Esquema experimental para la migración masiva de micropartículas dieléctricas.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2.1. Fabricación de la celda.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.2. Condiciones experimentales.....</b>	<b>49</b>
<b>3.3. Esquema experimental para la migración de partículas metálicas.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.1. Condiciones experimentales.....</b>	<b>50</b>
<b>Capítulo 4: Resultados y discusión.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. Resultados de la migración de micropartículas dieléctricas.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.1. Distancias recorridas por las partículas por unidad de tiempo.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1.2. Velocidad instantánea.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.3. Aglomerados por unidad de tiempo.....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.4. Interpretación general de los resultados.....</b>	<b>79</b>
<b>4.2. Resultados de la migración de micropartículas metálicas.....</b>	<b>80</b>
<b>4.2.1. Distancias recorridas por las partículas por unidad de tiempo.....</b>	<b>82</b>
<b>4.2.2. Aglomerados por unidad de tiempo.....</b>	<b>83</b>
<b>4.2.3. Otros fenómenos físicos relacionados a los experimentos con micropartículas de plata.....</b>	<b>86</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>88</b>
<b>Trabajo a futuro.....</b>	<b>91</b>
<b>Trabajos derivados de la tesis.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>93</b>

# Índice de figuras

Fig. 1 Arreglo experimental desarrollado en el trabajo de J. Wu [12]. El recuadro anaranjado muestra los haces ultrasónicos originados por los transductores (T) donde W es el ancho del haz en el punto focal. ....	23
Fig. 2 Arreglo experimental utilizado en el trabajo de Smith, Finzi y Bustamante [13].	23
Fig. 3 Pinzas magnéticas convencionales. La esfera paramagnética experimenta un momento magnético $m_0$ y una fuerza proporcional al gradiente del campo magnético (B) [14]. ....	24
Fig. 4 Tipos de fuerza óptica [15]. ....	24
Fig. 5 Esquema ilustrativo de las fuerzas ópticas presentes en el experimento de A. Constable [16]. ....	25
Fig. 6 Simulación por computador donde se observa a) Las fuerzas que actúan sobre los cloroplastos para formar el arreglo lineal ( $F_s$ , fuerza de esparcimiento y $F_g$ , fuerza de gradiente) y b) la distribución de calor del rayo láser guiado por la sonda de fibra cónica empleada por Hongbao Xin [18]. ....	26
Fig. 7 Arreglo experimental empleado en [19] donde se observa que la microfibra se encuentra inmersa en la mezcla dentro de un canal. En el recuadro de la izquierda se incluye una imagen real de la microfibra tomada con un microscopio electrónico de barrido. ....	26
Fig. 8 Distribución del calor producido en la punta de la fibra (se indica por el mapa de color), campos eléctricos de repulsión (ER) y el total generado por las micelas positivas y negativas (ET) que actúan sobre la nanopartícula atrapada (esfera de color verde) y distribución de las partículas que participan en el proceso de atrapamiento [20]. ....	27
Fig. 9 Corrientes de calor presentes en el canal cuando a) la fibra se encuentra a H=500 micras con una potencia de 40 mW y cuando b) la fibra se encuentra a H=230 micras con una potencia de 70 mW. Nótese que en a) el volumen del DMF es mayor que en b), lo cual influye en el tipo de corrientes de convección presentes [21]. ....	28
Fig. 10 Atrapamiento masivo de micropartículas dieléctricas por medio de un anillo de fibra óptica [22]. Aglomeración visible en a) minuto 0, b) minuto 4, c) minuto 9 y d) minuto 14. ....	28

Fig. 11 Proyección de un haz luminoso en una superficie lisa (a) y trazo de rayos reflejados especularmente (b).....	30
Fig. 12 Proyección de un haz luminoso en una superficie rugosa (a) y trazo de rayos reflejados difusamente (b).....	31
Fig. 13 Distribución de intensidades luminosas en una superficie Lambertiana. El rayo negro representa la dirección de la luz incidente, los números a la izquierda de este representan los ángulos de observación respecto de la normal en distintos rayos y los números en negrita (a la derecha del rayo incidente) representan los valores normalizados de la intensidad luminosa.....	31
Fig. 14 Un electrón es capaz de absorber energía electromagnética para saltar a un orbital superior (a). Posteriormente dicho electrón regresará a su orbital original liberando la energía que adquirió en forma, por ejemplo, de otra onda electromagnética. ....	32
Fig. 15 Haz luminoso con intensidad $I_0$ propagándose por un material contenido en una cubeta de espesor $\ell$ . Al salir de la cubeta se perderá una porción de la intensidad debido a la absorción, resultando en un haz saliente de intensidad $I$ .....	33
Fig. 16 Las longitudes de onda que absorbe un material son transformadas en otro tipo de energía mientras que las transmitidas provocan la sensación de color, como en a) y b). En caso de que todas las longitudes de onda sean absorbidas se presenta la ausencia de color, como en c). ....	33
Fig. 17 Tipos de transmisión de la luz. ....	34
Fig. 18 Partes de una fibra óptica. ....	34
Fig. 19 Perfiles escalonado y graduado que puede tener una fibra óptica. En el primer perfil, el índice de refracción $n$ se mantiene constante a lo largo de la posición $\rho$ , mientras que en el perfil graduado el índice de refracción cambia su valor dependiendo del punto del espacio del núcleo donde se encuentre. ....	34
Fig. 20 Un rayo que viaja de $P$ a $Q$ dentro del núcleo de una fibra óptica con índice escalonado. ....	35
Fig. 21 Reflexión total interna y reflexión parcial en una fibra óptica.....	35
Fig. 22 Esquema representativo del experimento de Soret. Generalmente cuando se expone una mezcla con partículas de distintos tamaños a una distribución de calor no uniforme, las partículas pequeñas se concentrarán en la región caliente mientras que las grandes lo harán en la región fría. ....	37
Fig. 23 a) Influencia del movimiento molecular de un fluido sobre la moción de una partícula, usualmente descrito por el movimiento Browniano y el coeficiente de difusión, $D$ y b) Una partícula expuesta a un gradiente de temperatura experimentará un movimiento que depende de las condiciones físico-químicas. Este efecto puede describirse mediante el coeficiente de difusión térmica, $DT$ . ....	38
Fig. 24 Partícula que experimenta una fuerza fotoforética por un haz Gaussiano.....	39
Fig. 25 Formas de modelar las fuerzas ópticas: (a) esparcimiento de Mie y (b) teoría de rayos ópticos.....	40
Fig. 26 En la fotoforesis indirecta positiva el objeto irradiado se desplaza en la misma dirección de propagación del haz. ....	41

Fig. 27 En la fotoforesis indirecta negativa el objeto irradiado se desplaza en dirección contraria a la propagación del haz. ....	41
Fig. 28 Moción provocada por la fotoforesis de tipo $\Delta T$ en partículas esféricas transparentes cuando a) la partícula es comparable a la longitud de onda y b) cuando la partícula es mucho mayor a la longitud de onda. Las flechas azules indican la dirección de desplazamiento de las partículas, mientras que los puntos negros dentro de ellas representan la tasa de producción local de calor [33]. ....	42
Fig. 29 La fotoforesis de tipo $\Delta T$ es producto de una variación de temperatura en la superficie de la partícula irradiada. Aquí, $\nabla T_m$ representa el gradiente de temperatura en el medio circundante (el cual es cero para este tipo de fotoforesis), $\nabla T_p$ es el gradiente de temperatura en la superficie de la partícula (el cual es diferente de cero) y $F_{\Delta T}$ representa la fuerza fotoforética de tipo $\Delta T$ [34]. ....	43
Fig. 30 Fuerzas que actúan sobre una partícula altamente absorbente. Las flechas rojas indican el intercambio de momento ejercido por las moléculas de la partícula sobre el medio circundante, mientras que las amarillas representan el intercambio de momento ejercido por las moléculas del medio hacia la partícula. La flecha verde es la fuerza fotoforética de tipo $\Delta\alpha$ [34]. ....	44
Fig. 31 Arreglo experimental para realizar la fotodeposición, donde 1 es la fuente láser, 2 es la fibra óptica y 3 es el microtubo que contiene la suspensión de nanopartículas de plata. ....	46
Fig. 32 Cara fotodepositada de la fibra óptica. ....	47
Fig. 33 Arreglo experimental para el estudio de las partículas donde 1 es la fuente de iluminación blanca (LED), 2 es una lente convergente, 3 es el divisor de haz, 4 es el objetivo de microscopio, 5 es el filtro de color, 6 es la celda, 7 es el detector CMOS, 8 y 9 son las etapas micrométricas para controlar las posiciones del objetivo y de la fibra óptica, 10 es la fuente de luz láser ( $\lambda=455$ nm) y 11 es la fibra óptica. ....	48
Fig. 34 Composición de la celda fabricada donde 1 es el portaobjetos inferior, 2 es la capa de cinta adhesiva doble cara, 3 es el portaobjetos superior, 4 es el canal donde se inserta la muestra y 5 es el canal donde se inserta la fibra óptica. ....	49
Fig. 35 Esquema ilustrativo de las fuerzas presentes en la migración por termoforesis, donde E es la dirección de propagación de la luz, $F_t$ es la fuerza termoforética, $F_a$ es la fuerza de arrastre y $F_r$ es la fricción. Note que, debido a la fricción con la celda en las partículas precipitadas, la velocidad tendrá que ser menor comparada con el caso donde no hay fricción con la celda, por lo que es lógico que $v_1 > v_2$ . ....	52
Fig. 36 Representación gráfica del rastreo de las partículas seleccionadas por instantes iguales de tiempo. Los puntos coloreados representan las posiciones de las partículas rastreadas (morado: partícula 1, negro: partícula 2, rojo: partícula 3, verde: partícula 4, cian: partícula 5). ....	53
Fig. 37 Gráficos que describen las distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 4dB, b) donde P= 43 mW y atn= 4dB, c) con P=72 mW y atn= 4dB, d) cuando P= 20mW y atn= 6dB, e) donde P= 43 mW y atn=6 dB y f) con P=72 mW y atn=6 dB. ....	54
Fig. 38 Gráficos que describen las distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW,	

empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 8 dB. b) donde P= 43 mW y atn= 8 dB y c) con P=72 mW y atn= 8dB. ....	55
Fig. 39 Gráficos que describen las distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 2 dB. b) donde P= 105 mW y atn= 2 dB. c) con P=200 mW y atn= 2 dB y d) con P= 20 mW y atn= 3 dB. ....	57
Fig. 40 Gráficos que describen las distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 105 mW empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 3 dB. b) donde P= 20 mW y atn= 4 dB y c) con P=105 mW y atn= 4 dB. ....	58
Fig. 41 Para calcular la velocidad instantánea primero se selecciona una partícula que se encuentre en el incremento $\Delta d$ deseado y se registra su posición en pixeles en el instante 1. Posteriormente se toma su posición en el instante 2. La diferencia entre estas dos posiciones se transforma a micras y se asocia al tiempo transcurrido entre el instante 1 y el 2. ....	60
Fig. 42 Gráficos que describen las velocidades instantáneas adquiridas por las partículas de poliestireno de 1 micra cuando la fibra óptica fue fotodepositada con nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia (atn) de a) 4 dB, b) 6 dB y c) 8 dB. Las líneas trazadas dentro de cada gráfica corresponden a potencias de operación del láser de 20, 43 y 72 mW ....	61
Fig. 43 Gráficos que describen las velocidades instantáneas adquiridas por las partículas de poliestireno de 3 micras cuando la fibra óptica fue fotodepositada con nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia (atn) de a) 2 dB, b) 3 dB y c) 4 dB. Las líneas trazadas dentro de cada gráfica corresponden a potencias de operación del láser de 20, 105 y 200 mW. ....	63
Fig. 44 Dimensiones del área de interés (recuadro azul) y de la partícula (recuadro verde) con sus respectivas notaciones. ....	65
Fig. 45 Gráficos donde se registra la aglomeración de partículas de poliestireno de 1 micra en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 4dB, b) donde P= 43 mW y atn= 4dB, c) con P=72 mW y atn= 4dB, d) cuando P= 20mW y atn= 6dB, e) donde P= 43 mW y atn=6 dB y f) con P=72 mW y atn=6 dB. ....	66
Fig. 46 Gráficos donde se registra la aglomeración de partículas de poliestireno de 1 micra en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 8 dB, b) donde P= 43 mW y atn= 8 dB y c) con P=72 mW y atn= 8 dB. ....	67
Fig. 47 Aglomeración ocurrida durante el experimento 1, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB. ....	69
Fig. 48 Aglomeración ocurrida durante el experimento 2, donde el láser operó con una potencia de 43 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB. ....	70

Fig. 49 Aglomeración ocurrida durante el experimento 3, donde el láser operó con una potencia de 72 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB.....	70
Fig. 50 Aglomeración ocurrida durante el experimento 4, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 6 dB.....	70
Fig. 51 Aglomeración ocurrida durante el experimento 5, donde el láser operó con una potencia de 43 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 6 dB.....	71
Fig. 52 Aglomeración ocurrida durante el experimento 6, donde el láser operó con una potencia de 72 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 6 dB.....	71
Fig. 53 Aglomeración ocurrida durante el experimento 7, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 8 dB.....	71
Fig. 54 Aglomeración ocurrida durante el experimento 8, donde el láser operó con una potencia de 43 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 8 dB.....	72
Fig. 55 Aglomeración ocurrida durante el experimento 9, donde el láser operó con una potencia de 72 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 8 dB.....	72
Fig. 56 Gráficos donde se registra la aglomeración de partículas de poliestireno de 3 micras en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 2 dB, b) donde P= 105 mW y atn= 2 dB, c) cuando P= 200 mW y atn= 2 dB y d) con P=20 mW y atn= 3 dB. ....	73
Fig. 57 Gráficos donde se registra la aglomeración de partículas de poliestireno de 3 micras en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 105 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 3 dB, b) donde P= 20 mW y atn= 4 dB y c) cuando P= 105 mW y atn= 4 dB.....	74
Fig. 58 Aglomeración ocurrida durante el experimento 10, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 2 dB. ....	77
Fig. 59 Aglomeración ocurrida durante el experimento 11, donde el láser operó con una potencia de 105 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 2 dB. ....	77
Fig. 60 Aglomeración ocurrida durante el experimento 12, donde el láser operó con una potencia de 200 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 2 dB. ....	77
Fig. 61 Aglomeración ocurrida durante el experimento 13, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 3 dB. ....	78

Fig. 62 Aglomeración ocurrida durante el experimento 14, donde el láser operó con una potencia de 105 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 3 dB. ....	78
Fig. 63 Aglomeración ocurrida durante el experimento 15, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB. ....	78
Fig. 64 Aglomeración ocurrida durante el experimento 16, donde el láser operó con una potencia de 105 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB. ....	79
Fig. 65 Fuerzas que actúan sobre las partículas metálicas por efecto de la fotoforesis de tipo $\Delta\alpha$ , donde $E$ es la dirección de propagación del haz luminoso y $F\Delta\alpha$ es la fuerza fotoforética $\Delta\alpha$ . Las flechas verdes y rosas indican el intercambio de momento entre el medio huésped y la partícula. ....	81
Fig. 66 Esquema representativo de las fuerzas que actúan sobre las partículas metálicas por efecto de la termoforesis negativa, donde $E$ es la dirección de propagación del haz luminoso, $F_t$ es la fuerza termoforética y $\Delta T$ es el gradiente de temperatura generado por las micropartículas de plata cercanas a la cara de la fibra óptica. ....	81
Fig. 67 Fuerzas que actúan sobre las partículas metálicas por efecto de la fotoforesis positiva, donde $E$ es la dirección de propagación del haz luminoso, $F_f$ es la fuerza fotoforética y $\Delta T$ es el gradiente de temperatura en la superficie de la partícula. ....	82
Fig. 68 Gráficos donde se describen las distancias recorridas por las partículas de plata de 1 micra en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser ( $P$ ) de 110 mW y b) donde $P = 204$ mW. ....	82
Fig. 69 Gráficos donde se registra el número de partículas de plata de 1 micra que se aglomeraron en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser ( $P$ ) de 110 mW y b) donde $P = 204$ mW. ....	83
Fig. 70 Aglomeración ocurrida durante el experimento 17, donde el láser operó con una potencia de 110 mW. ....	84
Fig. 71 Aglomeración ocurrida durante el experimento 18, donde el láser operó con una potencia de 204 mW. ....	84
Fig. 72 Migración masiva ocurrida al alejar la fibra óptica de la zona de aglomeración cuando la potencia de operación del láser fue de 110 mW (experimento 17). En esta figura puede apreciarse a) la aglomeración original de micropartículas de plata, b) el instante en que la fibra fue desplazada, c) el desplazamiento de las partículas y d) la reagrupación en las vecindades de la fibra. ....	85
Fig. 73 Migración masiva ocurrida al alejar la fibra óptica de la zona de aglomeración cuando la potencia de operación del láser fue de 204 mW (experimento 18). En esta figura puede apreciarse a) la aglomeración original de micropartículas de plata, b) el instante en que la fibra fue desplazada, c) el desplazamiento de las partículas y d) la reagrupación en las vecindades de la fibra. ....	85
Fig. 74 Desplazamiento atípico de las micropartículas de plata en la misma dirección de propagación del haz utilizando una potencia de operación del láser de 110 mW (experimento 17). Aquí se observan a) las partículas que se encuentran en la vecindad de la fibra óptica, b) grupos de partículas moviéndose en la misma dirección de propagación del haz donde la mancha señalada con la flecha azul es un punto de	

referencia y la mancha señalada con flecha verde es un microobjeto, c) un desplazamiento del microobjeto respecto del punto de referencia y d) partículas aglomeradas en las lejanías de la fibra óptica..... 86

Fig. 75 Desplazamiento atípico de las micropartículas de plata en la misma dirección de propagación del haz utilizando una potencia de operación del láser de 204 mW (experimento 18). Aquí se observan a) las partículas que se encuentran en la vecindad de la fibra óptica, b) grupos de partículas moviéndose en la misma dirección de propagación del haz donde se señalan las posiciones originales de dos grupos de partículas, los cuales están encerrados en óvalos, c) un desplazamiento de ambos grupos de partículas y d) partículas aglomeradas en las lejanías de la fibra óptica. ... 87



# Índice de tablas

Tabla 1 Condiciones experimentales para las partículas dieléctricas de poliestireno de látex. ....	50
Tabla 2 Condiciones experimentales para las partículas metálicas de plata. ....	50
Tabla 3 Velocidades promedio y distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 4dB, b) donde P= 43 mW y atn= 4dB, c) con P=72 mW y atn= 4dB, d) cuando P= 20mW y atn= 6dB, e) donde P= 43 mW y atn=6 dB, f) con P=72 mW y atn=6 dB, g) cuando P= 20 mW y atn= 8 dB, h) donde P= 43 mW y atn= 8 dB e i) con P=72 mW y atn= 8dB. ....	56
Tabla 4 Velocidades promedio y distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 2 dB, b) donde P= 105 mW y atn= 2 dB, c) con P= 200 mW y atn= 2dB, d) cuando P= 20 mW y atn= 3 dB, e) donde P= 105 mW y atn=3 dB, f) con P= 20 mW y atn= 4 dB y g) cuando P= 105 mW y atn= 4 dB. ....	59
Tabla 5 Velocidades instantáneas experimentadas por las partículas de poliestireno de 1 micra cuando la fibra óptica fue fotodepositada con nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia (atn) de a) 4 dB, b) 6 dB y c) 8 dB. Cada tabla presenta las velocidades adquiridas para potencias de operación del láser de 20, 43 y 72 mW.....	62
Tabla 6 Velocidades instantáneas experimentadas por las partículas de poliestireno de 3 micras cuando la fibra óptica fue fotodepositada con nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia (atn) de a) 2 dB, b) 3 dB y c) 4 dB. Cada tabla presenta las velocidades adquiridas para potencias de operación del láser de 20 y 105 mW.....	64
Tabla 7 Aglomeración de partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 4dB, b) donde P= 43 mW y atn= 4dB, c) con P=72 mW y atn= 4dB, d) cuando P= 20mW y atn= 6dB, e) donde P= 43 mW y atn=6 dB, f) y con P=72 mW y atn=6 dB. ....	68

Tabla 8 Aglomeración de partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 8 dB, b) donde P= 43 mW y atn= 8 dB y c) con P=72 mW y atn= 8 dB. ....	69
Tabla 9 Aglomeración de partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 2 dB, b) donde P= 105 mW y atn= 2 dB, c) con P= 200 mW y atn= 2 dB y d) cuando P= 20mW y atn= 3 dB. ....	75
Tabla 10 Aglomeración de partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 105 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 3 dB, b) donde P= 20 mW y atn= 4 dB y c) con P= 105 mW y atn= 4 dB. ....	76
Tabla 11 Ejemplo de cómo aumenta la velocidad de las partículas de acuerdo a la potencia con que opera el láser mientras la luz que sale de la punta de la fibra óptica experimenta una atenuación de 4 dB debida a la fotodeposición.....	79
Tabla 12 Ejemplo de cómo disminuye la velocidad de las partículas de acuerdo a la atenuación provocada por la fotodeposición, mientras el láser opera con una potencia de 20 mW. ....	80
Tabla 13 Velocidades promedio adquiridas y distancias recorridas por las partículas de plata de 1 micra en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 110 mW y b) donde P= 204 mW. ....	83
Tabla 14 Gráficos donde se registra el número de partículas de plata de 1 micra que se aglomeraron en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 110 mW y b) donde P= 204 mW. ....	84

# Índice de ecuaciones

Ecuación 1: $\theta_i = \theta_r$ .....	30
Ecuación 2: $I_r = I_n \cos(\theta)$ .....	31
Ecuación 3: $E_f = h \frac{c}{\lambda} = h\nu$ .....	32
Ecuación 4: $\Delta E = E_2 - E_1 = E_f$ .....	32
Ecuación 5: $A = -\log \frac{I_0}{I}$ .....	32
Ecuación 6: $T = \frac{I_0}{I}$ .....	33
Ecuación 7: $\theta_c = \cos^{-1} \left\{ \frac{n_{cl}}{n_{co}} \right\} = \sin^{-1} \left\{ 1 - \frac{n_{cl}^2}{n_{co}^2} \right\}^{1/2}$ .....	35
Ecuación 8: $n_{co} \cos \theta_z = n_{cl} \cos \theta_t$ .....	35
Ecuación 9: $U_E = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$ .....	36
Ecuación 10: $U_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2 U_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$ .....	36
Ecuación 11: $P = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$ .....	36
Ecuación 12: $u = \frac{S}{c}$ .....	36
Ecuación 13: $P(t) = \frac{S(t)}{c}$ .....	36
Ecuación 14: $\langle P(t) \rangle_T = \frac{\langle S(t) \rangle_T}{c} = \frac{I}{c}$ .....	36
Ecuación 15: $\langle P(t) \rangle_T = 2 \frac{\langle S(t) \rangle_T}{c}$ .....	36
Ecuación 16: $\langle P(t) \rangle_T = \frac{I}{c} (1 + \rho)$ .....	36
Ecuación 17: $AP = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ .....	37
Ecuación 18: $S_T = \frac{D_T}{D}$ .....	37
Ecuación 19: $V_T = -(D_T \nabla T)$ .....	38

Ecuación 20: $D = \frac{K_B T}{3\pi\eta d}$ .....	38
Ecuación 21: $F_p = \frac{2Pnr^2}{c\omega^2} Q$ .....	39
Ecuación 22: $F_R = 6\pi\eta r v$ .....	39
Ecuación 23: $v = \frac{2nPrQ}{3\pi c\omega^2\eta}$ .....	39
Ecuación 24: $Q(r, \theta) = \frac{4\pi nkl}{\lambda} B(r, \theta)$ .....	40
Ecuación 25: $\nabla T = \frac{\vec{s}}{2(k_p+k_m)}$ .....	43
Ecuación 26: $\alpha = \frac{T_r-T_i}{T_s-T_i}$ .....	44
Ecuación 27: $atn = 10 \log \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$ .....	47
Ecuación 28: $Drec_{pix} = P_o - P_n$ .....	52
Ecuación 29: $Drec_{mic} = \frac{(Drec_{pix})(Tpart_{mic})}{Tpart_{pix}}$ .....	53
Ecuación 30: $\Delta d_{mic} = \frac{(\Delta d_{pix})(Tpart_{mic})}{Tpart_{pix}}$ .....	60
Ecuación 31: $A = \frac{a_{pix}}{l_{pix}}$ .....	65
Ecuación 32: $B = \frac{b_{pix}}{l_{pix}}$ .....	65
Ecuación 33: $\#part_{agl} = (A)(B)$ .....	65
Ecuación 34: $\#part_{agl} = \left( \frac{a_{pix}}{l_{pix}} \right) \left( \frac{b_{pix}}{l_{pix}} \right)$ .....	65

# Capítulo 1: Introducción

La manipulación individual o masiva de partículas con dimensiones del orden de las micras o incluso más pequeñas es útil en gran número de aplicaciones, en disciplinas que van desde las ciencias de la vida hasta la física de semiconductores [1]. En el campo de las ciencias de la vida (biológicas) se ha aprovechado ampliamente el atrapamiento por medio de ondas para influir sobre el comportamiento de células vivas individuales como glóbulos rojos [2], levaduras [3], bacterias [4] y cloroplastos [5]. Adicionalmente, también se ha logrado la manipulación masiva de microorganismos, tal como ocurre en el trabajo de Reza Haghighi y Chien Chern Cheah [6] donde, por medio de una pinza óptica múltiple, se logra el atrapamiento y traslado masivo de células de levadura. En el campo de la química también se han desarrollado aplicaciones, por ejemplo, en química orgánica se ha logrado doblar y desdoblar moléculas proteínicas y de ADN, al adherir una esfera de poliestireno a uno de sus extremos. Posteriormente se induce movimiento en ella utilizando una pinza óptica [7]. En química inorgánica, por otro lado, se ha aprovechado la interacción de la luz con los materiales para orientarlos y dirigirlos de forma controlada, tal es el caso de los trabajos hechos con nanoláminas inorgánicas de arcilla (esmectitas), donde se toma ventaja de la anisotropía de dichos materiales para dirigirlos y rotarlos de acuerdo a la polarización del haz láser empleado para realizar el atrapamiento [8]. El campo de la nanotecnología se ha visto ampliamente beneficiado por la técnica de manipulación óptica. Por ejemplo, se ha logrado el atrapamiento de nanopartículas plasmónicas [9], nanotubos de carbono [10] y de nanopartículas metálicas como el oro [11].

Por lo anterior dicho, es evidente la importancia del estudio y perfeccionamiento de estas técnicas. La manipulación de partículas se ha hecho más eficiente a partir de los experimentos de A. Ashkin en la década de los 70's debido a que en ellos se propone un método no invasivo de atrapamiento. Estos experimentos dieron pie a la creación de las primeras pinzas ópticas en 1987, y éstas a su vez fueron la base del surgimiento de otras técnicas de atrapamiento que aprovechan el fenómeno ondulatorio ya sea electromagnético o acústico.

El atrapamiento de partículas no es la única aplicación derivada del fenómeno ondulatorio, de hecho, según fue demostrado teóricamente por James Clerk Maxwell, una onda por sí misma es capaz de ejercer una presión o fuerza sobre un objeto que se encuentre en su camino. Bajo las condiciones necesarias, esta fuerza es capaz de ocasionar un desplazamiento de dicho objeto en la misma dirección con que se propaga la onda. Siguiendo este razonamiento, es deducible que un haz de radiación pueda causar una moción colectiva de las partículas expuestas a él. Tal circunstancia permite, de la manera más simple, una migración masiva.

La realidad acerca de emplear el solo efecto de la presión de radiación para mover partículas es que, para un haz divergente o colimado, es más complicado generar una moción de microobjetos, pues la fuerza ejercida por la onda suele ser insuficiente. Para resolver este problema se han aprovechado otros fenómenos físicos que complementan las técnicas de manipulación masiva, situación que ha dado origen a una gran variedad de artilugios diseñados con este fin.

## **1.1. Técnicas de atrapamiento**

Se presenta a continuación una breve descripción de las principales técnicas de atrapamiento basadas en el fenómeno ondulatorio.

### **1.1.1. Atrapamiento acústico**

Aunque el sonido no es de naturaleza electromagnética puede también explicarse como un fenómeno ondulatorio que es portador de momento acústico y energía. Al intercambio de momento y energía con algún objeto interpuesto en el camino de una onda acústica se le conoce como fuerza de radiación acústica, la cual puede ser aprovechada para realizar el atrapamiento. El primero en demostrar la capacidad de las pinzas acústicas para manipular partículas fue J. Wu [12], al generar dos haces ultrasónicos de 3.5 MHz con direcciones de propagación contraria. De esta forma logró atrapar partículas de látex de 270 micras de diámetro y huevos de rana. El arreglo experimental consiste básicamente en colocar frente a frente dos transductores ultrasónicos de enfoque basados en PZT (titanato Zirconato de Pb) cuyos anchos de banda son idénticos entre sí, como se muestra en la Fig. 1. Estos dispositivos son capaces de transformar la energía eléctrica en acústica. La distancia focal de ambos transductores es de 2.5 cm. Los objetos a manipular se encuentran inmersos en agua dentro de una cámara de plexiglás ubicada en medio de los dos transductores. Según lo reportado por J. Wu el atrapamiento es muy estable a pesar del flujo intrínseco del agua. La manipulación axial y lateral de las partículas de estudio se logra al mover de la misma forma uno de los dos transductores o al sintonizar la frecuencia del voltaje eléctrico aplicado a los transductores.

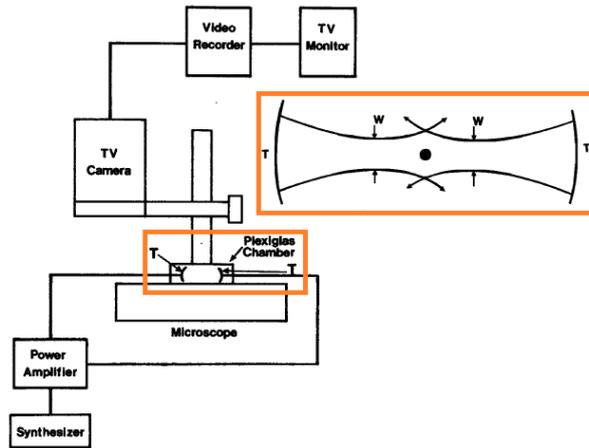


Fig. 1 Arreglo experimental desarrollado en el trabajo de J. Wu [12]. El recuadro anaranjado muestra los haces ultrasónicos originados por los transductores (T) donde W es el ancho del haz en el punto focal.

### 1.1.2. Atrapamiento con pinzas magnéticas

Así como es posible aprovechar el fenómeno electromagnético puede también usarse el fenómeno magnético por separado para manipular objetos. El uso más frecuente de las pinzas magnéticas es la aplicación de torque y tensión a moléculas de ADN para estudiar sus interacciones. Uno de los trabajos pioneros en el área de pinzas magnéticas es el publicado por S. B. Smith. y C. Bustamante [13] en el cual se usan actuadores magnéticos para estirar cadenas de ADN, como se aprecia en la Fig. 2. Para ello se adhiere uno de los extremos a un portaobjetos y otro a una esfera paramagnética. Para lograr la aplicación de la fuerza que estira la cadena de ADN se emite un campo magnético a través de un par de imanes. Dicho campo magnético atrae a la esfera permitiendo estirar la cadena de ADN de forma indirecta.

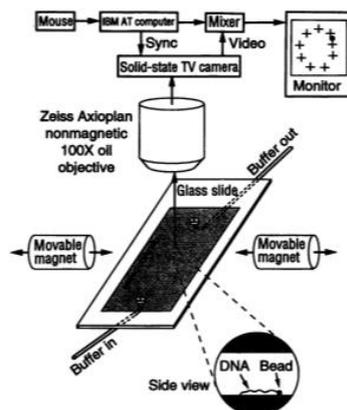


Fig. 2 Arreglo experimental utilizado en el trabajo de Smith, Finzi y Bustamante [13].

En la configuración de [13] los imanes se hallan a los lados del portaobjetos de vidrio que contiene las cadenas de ADN (véase Fig. 3). Al mover los imanes ocurrirá un cambio en la distribución del campo magnético, lo que a su vez influirá en la posición de la esfera

paramagnética. Por otro lado, las pinzas magnéticas convencionales muestran a los imanes por encima del portaobjetos, tal como se ilustra en la Fig. 3.

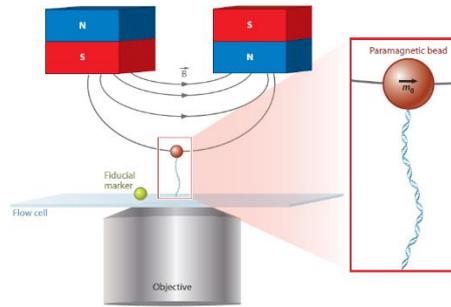


Fig. 3 Pinzas magnéticas convencionales. La esfera paramagnética experimenta un momento magnético  $m_0$  y una fuerza proporcional al gradiente del campo magnético ( $\vec{B}$ ) [14].

Las pinzas magnéticas convencionales son muy útiles para realizar mediciones de tensión y de rotación en moléculas individuales, sin embargo, no hacen el muestreo rotacional directamente puesto que la aplicación de torque a la esfera restringe la rotación libre de la cadena de ADN.

### 1.1.3. Atrapamiento basado en fuerza óptica.

Se basan en el uso de las fuerzas producidas por las ondas electromagnéticas en combinación con las fuerzas generadas por las condiciones intrínsecas del arreglo y la muestra. La fuerza esencial que gobierna a las pinzas ópticas es la presión de la radiación, la cual es responsable del movimiento de las partículas de estudio y es resultado de un intercambio de momento entre dichas partículas y el campo electromagnético. La presión de la radiación puede ser causada por la fuerza óptica ( $F_o$ ) [15], la cual es la sumatoria de la fuerza de esparcimiento ( $F_s$ ) y la fuerza de gradiente ( $F_g$ ), véase la Fig.4. La fuerza de esparcimiento empuja el objeto en la misma dirección del vector de Poynting (aleja al objeto de la fuente) mientras que la fuerza de gradiente está relacionada con la variación de la intensidad de la radiación y puede repeler o atraer el objeto hacia el punto de mayor intensidad. Cuando múltiples partículas interactúan entre sí es necesario incluir un tercer tipo de fuerza, la de unión (binding,  $F_b$ ), la cual está ligada a las propiedades de las partículas y de la radiación electromagnética.



Fig. 4 Tipos de fuerza óptica [15].

Para dirigir los haces de radiación electromagnética hacia la muestra estudiada existen varias técnicas que emplean diversos componentes ópticos como lentes, divisores de haz, moduladores espaciales de luz, fibras ópticas, etc. Estas últimas fueron introducidas en las trampas por A. Constable y M. Prentiss [16] al guiar dos haces dentro



una fibra monomodo cada uno, de esta manera, sus direcciones de propagación se encontraban generando un equilibrio de fuerzas, ilustradas en la Fig. 5, que permitieron el atrapamiento de partículas dieléctricas y levadura viva. Posteriormente surgieron otros trabajos basados en fibra óptica con distintas configuraciones y empleando otros fenómenos físicos como la transferencia de calor y la mecánica de fluidos.

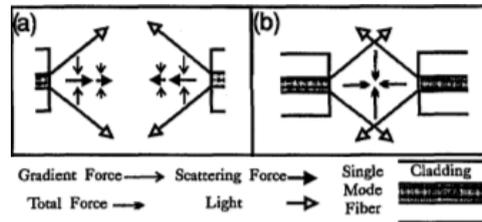


Fig. 5 Esquema ilustrativo de las fuerzas ópticas presentes en el experimento de A. Constable [16].

Hay configuraciones de pinzas ópticas basadas en fibra que emplean exclusivamente las fuerzas ópticas de esparcimiento y de gradiente para realizar el atrapamiento y pueden requerir desde una hasta  $n$  fibras cuya disposición depende de la forma en que las fuerzas producidas por cada haz contribuyen al atrapamiento. En ocasiones se requiere que las partículas a atrapar estén inmersas en un medio líquido, así, además de utilizar las fuerzas ópticas, se utiliza la fuerza de microfluído propia de la sustancia disolvente.

#### 1.1.4. Atrapamiento basado en el efecto fototérmico.

Las ondas electromagnéticas son portadoras de energía que puede transformarse en calor. Al aprovechar esta característica, es posible crear sistemas de fibra óptica que sean capaces de generar una moción en micro y nanopartículas, facilitando así su atrapamiento. Cuando la radiación electromagnética promueve un cambio de temperatura en un material, se manifiesta el efecto fototérmico.

Hay ocasiones en que el efecto fototérmico no es tan efectivo en los sistemas de atrapamiento basados en fibra óptica convencional [17], razón por la cual es necesario aumentar la magnitud del calor generado por efectos de la luz. Principalmente, hay dos formas de lograr este propósito. La primera es incrementar la intensidad de radiación de la fuente y la otra es aumentar la absorción de la luz.

Para incrementar la intensidad de radiación, generalmente se modifica la estructura original de una fibra óptica, de tal forma que su diámetro sea más pequeño de forma abrupta en un segmento o dando forma cónica a la punta. Ambos tipos de modificaciones son conocidos como micro/nano fibras dependiendo del tamaño del segmento o la punta modificados. Ahora bien, para aumentar la absorción de la luz, comúnmente se integran materiales especiales en alguno de los elementos que conforman al sistema. Un material especial es aquel que absorbe la radiación electromagnética de la fuente luminosa empleada en el atrapamiento.

## 1.2. Antecedentes

A continuación, se presentarán los antecedentes de la manipulación masiva de micropartículas dieléctricas y metálicas suspendidas en medios acuosos usando el efecto fototérmico.

### 1.2.1. Uso de micro/nano fibras para incrementar la radiación de la fuente.

Las microfibras o las nanofibras pueden ser construidas al calentar y estirar fibras ópticas convencionales. Estos dispositivos se pueden presentar como una fibra óptica con punta cónica, esto con el propósito de desviar los rayos para que se concentren en cierto punto, o como un hilo adelgazado y continuo, el cual puede ser empleado eficientemente como un sensor debido a que el estrechamiento de la fibra produce la propagación de un campo evanescente. Uno de los investigadores expertos en emplear fibras ópticas cónicas es Hongbao Xin, quien en el artículo “Non-contact intracellular binding of chloroplasts in vivo” [18] expone los resultados obtenidos al fabricar y usar una sonda de fibra óptica con punta cónica para manipular de forma controlada los cloroplastos contenidos en una hoja (véase la Fig. 6)

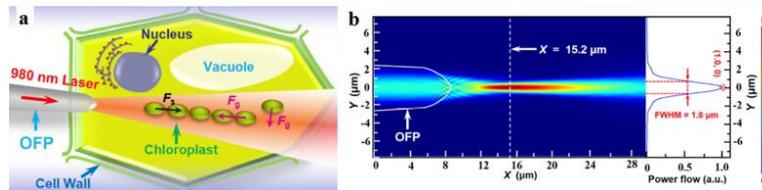


Fig. 6 Simulación por computador donde se observa a) Las fuerzas que actúan sobre los cloroplastos para formar el arreglo lineal ( $F_s$ , fuerza de esparcimiento y  $F_g$ , fuerza de gradiente) y b) la distribución de calor del rayo láser guiado por la sonda de fibra cónica empleada por Hongbao Xin [18].

Por otro lado, para ejemplificar el empleo de fibras ópticas adelgazadas en forma de un hilo continuo se menciona el trabajo de H. Lei y Y. Zhang [19] en el cual se logra realizar una separación de partículas de acuerdo a su tamaño en tres mezclas distintas de acuerdo a la Fig. 7. La primera de ellas es una combinación de partículas de polimetacrilato de metilo (PMMA) de 5 y 10 micras, la segunda incluye partículas de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) de 2.08 y 5.65 micras y la tercera es una mezcla de células de levadura y partículas de dióxido de silicio de 2.08 micras.

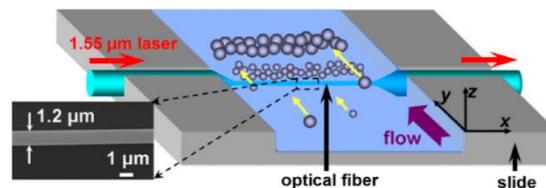


Fig. 7 Arreglo experimental empleado en [19] donde se observa que la microfibra se encuentra inmersa en la mezcla dentro de un canal. En el recuadro de la izquierda se incluye una imagen real de la microfibra tomada con un microscopio electrónico de barrido.

## 1.2.2. Uso de materiales especiales para aumentar la absorción de la luz.

La inclusión de materiales absorbentes en la longitud de onda de operación de la fuente hará que la energía del sistema aumente. La absorción de energía no solo depende del material en sí mismo, sino de otros parámetros como el tamaño de las partículas y la intensidad de la radiación láser. Principalmente, el uso de materiales especiales se realiza ya sea integrándolos a la fibra o integrándolos en la muestra de estudio. Uno de los artículos de investigación que explica el uso de materiales especiales integrados en la fibra óptica es el de Abhay Kotnala y Yuebing Zheng [20], en el cual se expone el uso y fabricación de una punta termoplasmónica (capa fina de oro recocida térmicamente en la cara de la fibra) que convierte los fotones en fonones. La muestra de estudio consiste en una solución de nanopartículas a la que se agrega un surfactante catiónico (cloruro de cetiltrimetilamonio, CTAC) con el objetivo de activar las fuerzas optotermoeléctricas. Este surfactante es capaz de aglomerarse en micelas positivas (cationes) y micelas negativas (iones de Cl), los cuales están indicados en la Fig. 8 como esferas grises y esferas negras.

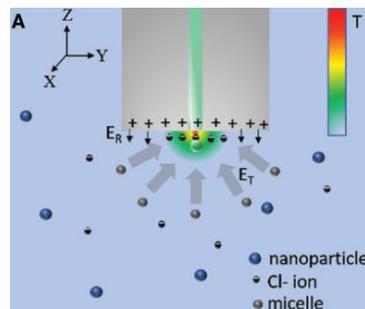


Fig. 8 Distribución del calor producido en la punta de la fibra (se indica por el mapa de color), campos eléctricos de repulsión ( $E_R$ ) y el total generado por las micelas positivas y negativas ( $E_T$ ) que actúan sobre la nanopartícula atrapada (esfera de color verde) y distribución de las partículas que participan en el proceso de atrapamiento [20].

Sin radiación láser los macrocationes o micelas (+) y los contraiones ( $\text{Cl}^-$ ) se encuentran dispersos de forma aleatoria pero cuando se incide la radiación láser ambos tipos de iones experimentan un coeficiente de Soret positivo que obedece a las fuerzas termofóricas. Dado que este coeficiente es mayor en las micelas estas se concentran más lejos de la fibra (en la parte fría), por el contrario, los iones de cloro al tener un coeficiente de Soret más pequeño se alejan menos de la fibra concentrándose así en la región caliente. El atrapamiento de la nanopartícula ocurre debido a un equilibrio entre el campo eléctrico total de las partículas  $E_T$  (que se distribuyen alrededor de ella) y el campo eléctrico producido por las cargas eléctricas positivas de la punta termoplasmónica  $E_R$ .

Ahora bien, como ejemplo de un trabajo donde se emplean materiales especiales integrados en la muestra de estudio se expone el trabajo de Y. Cheng, J. Yang y colaboradores [21] en el que se utiliza un dispositivo basado en una microburbuja inducida por láser. La configuración del experimento consiste en colocar una pequeña película de óxido de grafeno (GO) en el fondo de un canal, el cual contiene el líquido N,N-dimetilformamida (DMF). La fibra óptica es colocada por encima de la película y guía un haz láser de onda continua (CW) con longitud de onda de 1070 nm. Puesto que

el GO absorbe la luz láser de esta longitud de onda se produce una microburbuja, alrededor de la cual se generan corrientes de calor. Cuando el volumen del líquido es menor a 300 micras se observa convección de Marangoni en caso contrario se observan corrientes de convección verticales, es decir, el espesor es tal que permite el flujo del líquido en tres dimensiones. Para controlar la dinámica de las partículas de estudio o la intensidad de las corrientes de calor se aumenta o disminuye la potencia del láser. En la Fig. 9 puede apreciarse mejor la influencia de las condiciones experimentales sobre las fuerzas actuantes en cada caso.

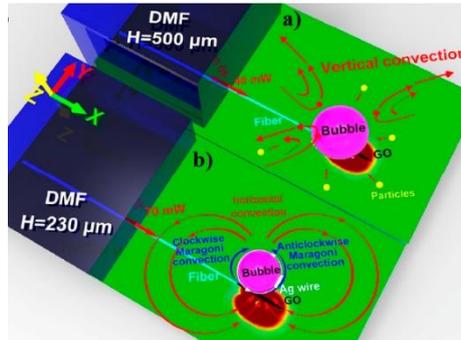


Fig. 9 Corrientes de calor presentes en el canal cuando a) la fibra se encuentra a  $H=500$  micras con una potencia de 40 mW y cuando b) la fibra se encuentra a  $H=230$  micras con una potencia de 70 mW. Nótese que en a) el volumen del DMF es mayor que en b), lo cual influye en el tipo de corrientes de convección presentes [21].

### 1.2.3. Aumento de esparcimiento de la luz mediante anillo de fibra óptica.

En el trabajo de Hongbao Xin [22], se presenta un nuevo tratamiento que puede darse a la fibra óptica para aumentar el esparcimiento de la luz, el cual simplemente consiste en darle forma de anillo, véase la Fig. 10. Mediante esta configuración, Hongbao Xin logró desplazar partículas dieléctricas de sílice de  $2.08\ \mu\text{m}$  que se encontraban suspendidas en agua. Dentro del anillo de fibra óptica se propagó la energía electromagnética producida por una fuente láser con longitud de onda de  $1550\ \text{nm}$ , la cual fue absorbida por las moléculas de agua, dando paso a dos fenómenos fototérmicos: la fotoforesis negativa en las partículas de sílice y la distribución no homogénea de calor en el agua (gradiente de temperatura).

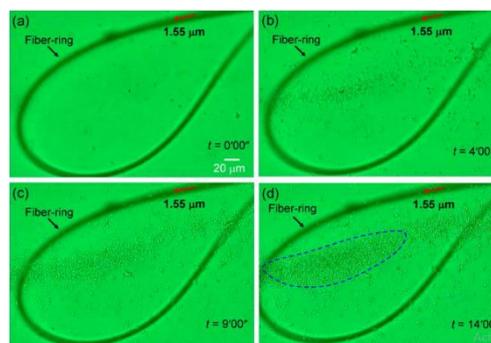


Fig. 10 Atrapamiento masivo de micropartículas dieléctricas por medio de un anillo de fibra óptica [22]. Aglomeración visible en a) minuto 0, b) minuto 4, c) minuto 9 y d) minuto 14.

Hasta el momento se ha presentado una breve revisión de las técnicas más comúnmente empleadas en la manipulación de partículas. Además, en la sección de antecedentes se han mencionado diversas formas de aprovechar el efecto fototérmico para lograr el mismo fin. Para continuar este trabajo se muestran a continuación el objetivo general y los objetivos particulares de este trabajo de tesis.

### **1.3. Objetivo general.**

Manipular masivamente micropartículas dieléctricas (poliestireno) o metálicas (plata) que se encuentran presentes en líquidos mediante termoforesis y/o fotoforesis.

### **1.4. Objetivos particulares.**

- Inmovilizar nanopartículas de plata en la punta de una fibra óptica.
- Generar el movimiento masivo de partículas dieléctricas suspendidas en una sustancia líquida a través de gradientes de temperatura.
- Caracterizar el movimiento de las partículas dieléctricas
- Manipular masivamente micropartículas dieléctricas usando radiación láser a través de una fibra óptica.

### **1.5. Estructura del trabajo de tesis.**

El presente trabajo de tesis está organizado de la siguiente forma:

- En el capítulo 1 se proporciona información general sobre las aplicaciones y beneficios que conlleva la aplicación de técnicas variadas para llevar a cabo la manipulación de microobjetos. También se describen brevemente las principales técnicas de atrapamiento y manipulación ya sea individual o masiva de partículas y otros objetos de la escala micrométrica.
- En el capítulo 2 se da una explicación más extensa sobre los principales fenómenos ópticos y térmicos que podrían estar presentes en los experimentos, abarcando temas básicos como la reflexión, absorción y transmisión de la luz, hasta mecanismos como la termoforesis y la fotoforesis.
- En el capítulo 3 se explica la metodología a seguir durante la etapa de experimentación y se da detalle de los materiales utilizados y de cómo son utilizados.
- En el capítulo 4 se describe la metodología a seguir para analizar los resultados experimentales, se dan a conocer los resultados cuantitativos obtenidos al aplicar dicha metodología y se da explicación a los resultados experimentales.

# Capítulo 2: Marco teórico.

El atrapamiento óptico de micropartículas y nanopartículas disueltas en un medio acuoso puede involucrar diversos fenómenos físicos ya sea de naturaleza óptica como la presión de radiación o termodinámica como la termoforesis, la cual, en caso de ser inducida por acción de una onda electromagnética puede ser denominada fotoforesis. Estos fenómenos y otros conceptos que son básicos para entender la presente investigación serán explicados con mayor detalle en este capítulo.

## 2.1. Reflexión de la luz.

Considérese una superficie lisa sobre la cual es proyectado un haz luminoso formando un ángulo  $\theta$  con respecto a una línea imaginaria perpendicular a la superficie (normal), como se muestra en la Fig. 11. Si los átomos que conforman el material iluminado no absorben o absorben poca de la energía radiante ocurrirá un cambio en la dirección del haz tal que viaje en dirección contraria a cómo ha llegado pero con el mismo ángulo  $\theta$ . A este fenómeno se le conoce como reflexión especular y puede representarse matemáticamente mediante la expresión:

$$\theta_i = \theta_r, \quad \text{Ecuación 1}$$

donde  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia del haz luminoso y  $\theta_r$  es el ángulo del haz reflejado.

La ocurrencia de la reflexión especular requiere, además, de que el rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie se hallen dentro del mismo plano.

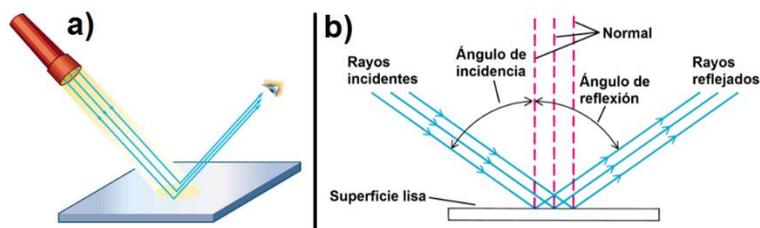


Fig. 11 Proyección de un haz luminoso en una superficie lisa (a) y trazo de rayos reflejados especularmente (b).

Otra forma de reflexión es la difusa. En ella, al igual que en el caso de la reflexión especular, también se requiere que los rayos incidentes con sus respectivas normales

y rayos reflejados se encuentren en el mismo plano. La diferencia es que el ángulo subtendido por un rayo incidente y su normal no es igual al que se forma entre dicha normal y su rayo reflejado, tal como se aprecia en la Fig. 12. Este tipo de reflexión es originado en superficies rugosas pues las irregularidades en el material desvían los rayos.

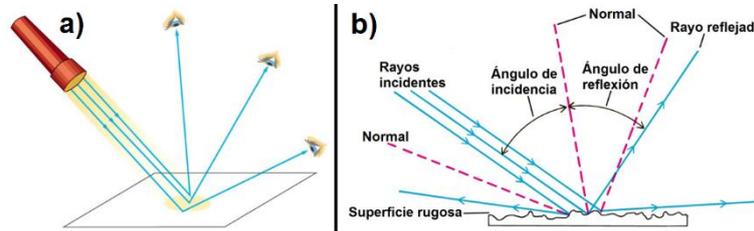


Fig. 12 Proyección de un haz luminoso en una superficie rugosa (a) y trazo de rayos reflejados difusamente (b).

Una forma de interpretar matemáticamente a la reflexión difusa es mediante la ley del coseno de Lambert en la cual se considera una superficie que proyecta la luz que le llega hacia todas las direcciones, de tal forma que la luz se distribuye como en la Fig. 13. Si sobre ella se incide un haz luminoso este se reflejará de acuerdo con la expresión:

$$I_r = I_n \cos(\theta), \quad \text{Ecuación 2}$$

donde  $I_r$  es la intensidad luminosa reflejada difusamente en el punto de observación,  $I_n$  es la intensidad luminosa en la dirección normal a la superficie y  $\theta$  es el ángulo entre  $I_r$  y la normal.

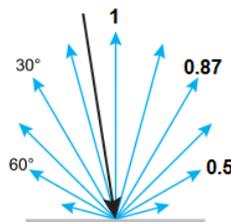


Fig. 13 Distribución de intensidades luminosas en una superficie Lambertiana. El rayo negro representa la dirección de la luz incidente, los números a la izquierda de éste representan los ángulos de observación respecto de la normal en distintos rayos y los números en negrita (a la derecha del rayo incidente) representan los valores normalizados de la intensidad luminosa.

## 2.2. Absorción de la luz.

La energía radiante que está en contacto con los átomos y/o moléculas de un material puede ser absorbida bajo ciertas condiciones y posteriormente transformada en otro tipo de energía. Este proceso se da en forma selectiva, es decir, no ocurre de la misma forma para cualquier tipo de sustancia ni para cualquier tipo de onda electromagnética.

La causa de que la absorción de la luz sea específica se debe a la naturaleza discreta de la energía en un átomo pues, de acuerdo con el modelo de Niels Bohr, la transición entre un orbital electrónico inferior y otro superior consecutivo representa una cantidad definida de energía (obsérvese la Fig. 14). Así pues, una onda electromagnética que

está en contacto con un átomo será absorbida por un electrón de valencia sólo si cuenta con la energía necesaria para hacer que el electrón salte a otro orbital. Dicho con otras palabras, la energía radiante debe ser igual a la diferencia de energía entre el orbital superior y el orbital inferior.

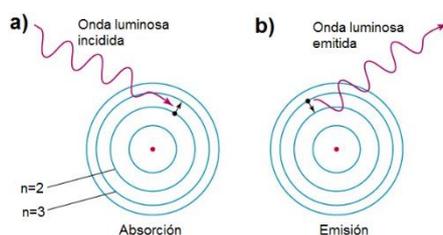


Fig. 14 Un electrón es capaz de absorber energía electromagnética para saltar a un orbital superior (a). Posteriormente dicho electrón regresará a su orbital original liberando la energía que adquirió en forma, por ejemplo, de otra onda electromagnética.

Desde el punto de vista cuántico, la luz no solo se comporta como una onda sino también como una partícula, el fotón. La energía que porta el fotón es también discreta y su valor se determina por,

$$E_f = h \frac{c}{\lambda} = h\nu, \quad \text{Ecuación 3}$$

donde  $E_f$  es la energía del fotón,  $h$  es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ),  $c$  es la velocidad de la luz,  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz y  $\nu$  es la frecuencia de la luz.

Por otro lado, la energía del fotón necesaria para hacer que el electrón sea excitado debe ser igual a la diferencia de energía entre los orbitales superior e inferior ( $\Delta E$ ). Así,

$$\Delta E = E_2 - E_1 = E_f, \quad \text{Ecuación 4}$$

donde  $\Delta E$  es la diferencia de energía entre los orbitales,  $E_2$  es la energía en el orbital superior y  $E_1$  es la energía del orbital inferior.

A nivel macroscópico, la absorción de la luz se manifiesta como una atenuación de la intensidad luminosa luego de que la radiación haya interactuado con un material, como se ilustra en la Fig. 15. Para cuantificar este suceso se utiliza la ley de Lambert-Beer para la absorbancia.

$$A = -\log \frac{I_0}{I}, \quad \text{Ecuación 5}$$

donde  $A$  es la absorbancia,  $I_0$  es la intensidad luminosa incidente e  $I$  es la intensidad luminosa luego de que la luz pasara por el material.



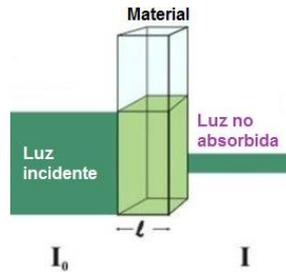


Fig. 15 Haz luminoso con intensidad  $I_0$  propagándose por un material contenido en una cubeta de espesor  $l$ . Al salir de la cubeta se perderá una porción de la intensidad debido a la absorción, resultando en un haz saliente de intensidad  $I$ .

## 2.3. Transmisión de la luz.

En cierto sentido, la transmisión de la luz es lo contrario a la absorción. Está definida como la capacidad de un material para transferir un haz luminoso y puede cuantificarse mediante,

$$T = \frac{I_0}{I}, \quad \text{Ecuación 6}$$

donde  $T$  es la transmitancia del material.

La luz blanca es una forma de radiación que contiene energía luminosa de distintas longitudes de onda, incluyendo al espectro visible. Cuando un haz de este tipo llega a un material se absorberán algunas longitudes de onda pero otras serán transmitidas. Estas últimas pueden ser percibidas por el ojo o algún detector. En resumen, las ondas del espectro visible que no se absorben en un material son las que causan la sensación de color como se ejemplifica en la Fig. 16.

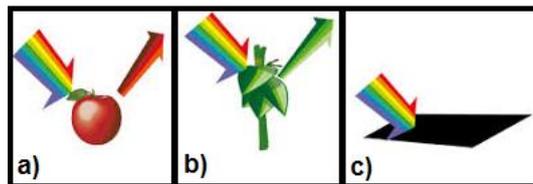


Fig. 16 Las longitudes de onda que absorbe un material son transformadas en otro tipo de energía mientras que las transmitidas provocan la sensación de color, como en a) y b). En caso de que todas las longitudes de onda sean absorbidas se presenta la ausencia de color, como en c).

La transmitancia de un material no solo depende del porcentaje de la luz que es absorbido dentro de él, sino también de qué tanto se esparce o se refleja superficialmente (véase la Fig. 17). Tomando esto en consideración se puede clasificar a la transmisión de la luz en dos tipos principales:

- Transmisión directa: Ocurre cuando la luz, al ser transmitida, conserva o difiere poco de su trayectoria original.
- Transmisión difusa: La trayectoria del haz luminoso no mantiene su forma mientras viaja en el material y, de hecho, se extiende obedeciendo a la distribución de intensidades propia de la reflexión difusa ideal.

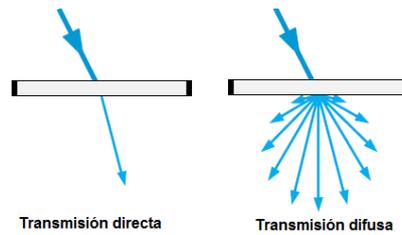


Fig. 17 Tipos de transmisión de la luz.

## 2.4. Propagación de la luz en la fibra óptica.

Una fibra óptica es una estructura transparente que transporta energía electromagnética. La sección transversal de estas fibras es comparable al tamaño de un cabello humano y generalmente se divide en tres capas: el núcleo, el recubrimiento y el revestimiento. Dicha estructura se presenta en la Fig. 18.

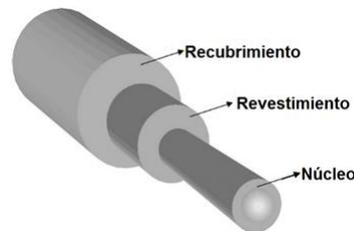


Fig. 18 Partes de una fibra óptica.

El núcleo puede tener un índice de refracción constante o graduado, es decir, que varía dependiendo de la posición dentro del núcleo, como se detalla en la Fig. 19. Las guías de onda pueden dividirse en dos subclases, multimodo (en la cual pueden viajar varios modos de propagación) y monomodo (donde solo un modo de propagación es transmitido por la fibra óptica). El tratamiento analítico de la propagación de energía en una guía de onda se puede estudiar con las ecuaciones de Maxwell mientras que para tratar la propagación en guías de onda multimodo se emplea la óptica geométrica. Para nuestros propósitos es conveniente detallar mayormente el análisis matemático de las fibras ópticas multimodo con perfil escalonado, porque este es el tipo de fibra empleada en los experimentos.

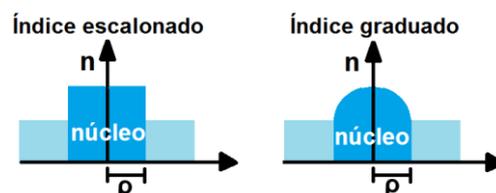


Fig. 19 Perfiles escalonado y graduado que puede tener una fibra óptica. En el primer perfil, el índice de refracción  $n$  se mantiene constante a lo largo de la posición  $\rho$ , mientras que en el perfil graduado el índice de refracción cambia su valor dependiendo del punto del espacio del núcleo donde se encuentre.

La propagación de luz en el núcleo de la guía de onda con índice escalonado se da en forma de líneas rectas (véase la Fig. 20), por ejemplo, considere un rayo que viaja desde  $P$  a  $Q$  con un ángulo  $\theta_z$ . En  $Q$  puede ocurrir refracción debido a que es un punto de la interfaz núcleo-recubrimiento pero también puede ocurrir reflexión. Habrá reflexión total interna cuando  $0 \leq \theta_z < \theta_c$  mientras que habrá reflexión parcial cuando  $\theta_c < \theta_z \leq \frac{\pi}{2}$  donde  $\theta_c$  es el ángulo crítico, definido por

$$\theta_c = \cos^{-1} \left\{ \frac{n_{cl}}{n_{co}} \right\} = \sin^{-1} \left\{ 1 - \frac{n_{cl}^2}{n_{co}^2} \right\}^{1/2}, \quad \text{Ecuación 7}$$

donde  $n_{cl}$  es el índice de refracción del revestimiento y  $n_{co}$  es el índice de refracción del núcleo.

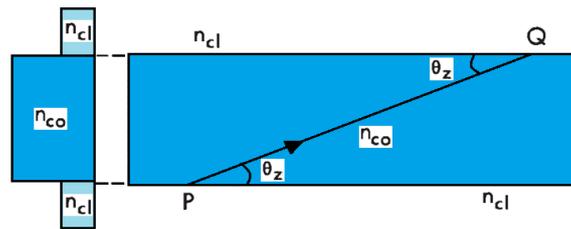


Fig. 20 Un rayo que viaja de  $P$  a  $Q$  dentro del núcleo de una fibra óptica con índice escalonado.

Solamente la reflexión total interna regresa toda la potencia mientras que la reflexión parcial no, de forma que satisface la ley de Snell.

$$n_{co} \cos \theta_z = n_{cl} \cos \theta_t, \quad \text{Ecuación 8}$$

donde  $\theta_t$  es el ángulo entre el rayo transmitido y la frontera núcleo-recubrimiento (interfaz).

Cuando el rayo se refleja de forma total interna, toda la energía se propaga por la fibra. Cuando el rayo se refleja parcialmente, este sufre pérdida de energía, pues en cada reflexión una parte se refracta fuera del núcleo. Tales comportamientos se representan en la Fig. 21.

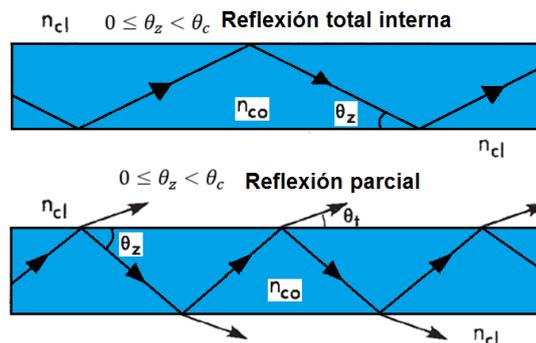


Fig. 21 Reflexión total interna y reflexión parcial en una fibra óptica.

## 2.5. Presión de radiación.

El fenómeno ondulatorio es en sí mismo una manifestación de energía y como tal es capaz de ejercer efectivamente una presión. Según Maxwell “en un medio en el que las ondas se propagan existe una presión en la dirección normal a las ondas numéricamente igual a la energía en una unidad de volumen”. Por tanto la presión de radiación,  $P$  ejercida por la onda es equivalente a su densidad de energía ( $u$ ), la cual a su vez es el resultado de la sumatoria de la densidad de energía del campo eléctrico ( $U_E$ ) más la densidad de energía del campo magnético ( $U_B$ ). En el vacío, estas densidades de energía se expresan como [23]:

$$U_E = \frac{\epsilon_0}{2} E^2, \quad \text{Ecuación 9}$$

$$U_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2, \quad \text{Ecuación 10}$$

por lo que la presión de radiación,  $P = U_E + U_B$  puede darse de forma equivalente como:

$$P = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2, \quad \text{Ecuación 11}$$

por otro lado es posible expresar a la presión de radiación en términos del vector de Poynting,  $S$  dado que

$$u = \frac{S}{c}, \quad \text{Ecuación 12}$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. Siguiendo este razonamiento, ahora

$$P(t) = \frac{S(t)}{c}, \quad \text{Ecuación 13}$$

lo que representa la presión instantánea ejercida por un haz electromagnético perpendicular a una superficie totalmente absorbente.

Ya que los campos eléctrico y magnético varían rápidamente afectando también al flujo de energía, es conveniente transformar la expresión anterior para definirla en términos de su promedio temporal

$$\langle P(t) \rangle_T = \frac{\langle S(t) \rangle_T}{c} = \frac{I}{c}, \quad \text{Ecuación 14}$$

donde  $I$  es la irradiancia.

Para una superficie totalmente reflectante el cambio de momento se duplica pues el haz entra con una velocidad  $+c$  y sale con una velocidad  $-c$ . Así:

$$\langle P(t) \rangle_T = 2 \frac{\langle S(t) \rangle_T}{c}. \quad \text{Ecuación 15}$$

Ahora bien, para una superficie que absorbe pero también refleja se modifica la expresión matemática para la presión de radiación de esta manera

$$\langle P(t) \rangle_T = \frac{I}{c} (1 + \rho), \quad \text{Ecuación 16}$$

donde  $\rho$  es la reflectividad y puede tomar valores del cero al uno.

Otra forma de estudiar a la presión de radiación es considerándola como el resultado de sumar un conjunto de fuerzas que la onda ejerce sobre las cargas de la superficie

irradiada. Esto puede calcularse mediante la segunda ley de Newton, donde la fuerza es igual al ritmo de cambio del momento  $p$  es decir:

$$AP = \frac{\Delta p}{\Delta t}, \quad \text{Ecuación 17}$$

donde  $A$  es el área donde incide la onda y  $t$  es el tiempo.

## 2.6. Termoforesis.

En 1856 el científico alemán Carl Friedrich Wilhelm Ludwig llenó un tubo en U con una solución que contenía un 8.98% de sulfato de sodio, colocó un extremo en agua hirviendo y el otro en agua congelada. Observó que el soluto se concentraba en la región fría del tubo [24], reportó sus observaciones pero no dio explicaciones teórico-matemáticas al respecto. Posteriormente, en 1879 el científico suizo Charles Soret colocó cloruro de sodio y nitrato de potasio en un tubo vertical de 30 cm de largo y 2 cm de diámetro, expuso el extremo inferior a 80 °C y el superior a temperatura ambiente. Bajo estas condiciones se notó que la concentración de soluciones de sal en un tubo no permanece uniforme, evento que se representa en la Fig. 22. Tanto en el experimento de Ludwig como en el de Soret se genera un gradiente de temperatura al exponer los extremos de los tubos a temperaturas distintas, como consecuencia, los solutos de las mezclas que se hallaban dentro de los tubos se concentraron masivamente en regiones particulares obedeciendo a la distribución de temperatura.

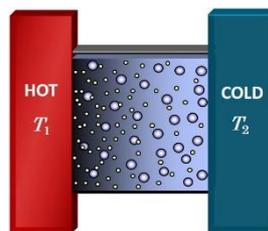


Fig. 22 Esquema representativo del experimento de Soret. Generalmente cuando se expone una mezcla con partículas de distintos tamaños a una distribución de calor no uniforme, las partículas pequeñas se concentrarán en la región caliente mientras que las grandes lo harán en la región fría.

Lo ocurrido en estos experimentos fue la base para explicar lo que hoy se conoce como efecto Soret, el cual es también conocido como difusión térmica o termoforesis y se define como la respuesta de ciertas partículas que son parte de un coloide ante un gradiente de temperatura. Dicha respuesta se presenta en forma de un movimiento que depende de variables como la masa de las partículas, el medio donde se encuentran disueltas y el valor mismo de la temperatura donde estas se hallan.

Suponiendo una disolución formada por partículas y un fluido isotrópico encerrado, sin fuerzas externas, expuesto a un gradiente de temperatura y cuyo flujo de masa es despreciable, el coeficiente de Soret ( $S_T$ ), que define la eficacia de separación de las partículas, se da por [25]

$$S_T = \frac{D_T}{D}, \quad \text{Ecuación 18}$$

donde  $D_T$  es el coeficiente de difusión térmica y  $D$  es el coeficiente de difusión.

Si para cierto tipo de partícula se obtiene un coeficiente de Soret positivo (lo que normalmente ocurre cuando la partícula es de gran tamaño) la migración ocurre de la región caliente a la fría, a esto se le conoce como termoforesis positiva. Si se obtiene un coeficiente de Soret negativo (usualmente cuando la partícula es de un tamaño pequeño), la migración ocurre de la región fría a la caliente dando lugar a la termoforesis negativa.

Los parámetros involucrados en el cálculo del coeficiente de Soret son, como ya se dijo, el coeficiente de difusión térmica ( $D_T$ ) y el coeficiente de difusión ( $D$ ). La influencia de estos parámetros sobre el movimiento de una partícula se representa en la Fig. 23. El primero representa la facilidad que tiene un soluto para moverse en un solvente que ha sido expuesto a una distribución no uniforme de calor. Su valor es dependiente de la concentración en la mezcla, el tipo y tamaño de la partícula y de la temperatura. El producto de este coeficiente con el gradiente de temperatura ( $\nabla T$ ) da como resultado la velocidad a la que se mueve la partícula ( $V_T$ ). Cuando  $D_T$  es negativo la partícula experimenta termoforesis positiva.

$$V_T = -(D_T \nabla T). \quad \text{Ecuación 19}$$

Por otro lado, el coeficiente de difusión ( $D$ ) es la capacidad de un soluto para moverse en un disolvente cuando la mezcla se halla en un estado molecular estable. Típicamente este coeficiente se expresa en términos del movimiento Browniano, el cual se genera cuando, al exponerse una partícula a un fluido, esta experimenta un movimiento aleatorio que es resultado de las interacciones entre las moléculas o átomos vibrantes que forman parte del fluido y la partícula en cuestión [26]. La siguiente formula describe el coeficiente de difusión para el movimiento Browniano.

$$D = \frac{K_B T}{3\pi\eta d}, \quad \text{Ecuación 20}$$

donde  $K_B$  es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura absoluta,  $\eta$  es la viscosidad del solvente y  $d$  es el diámetro de la partícula.

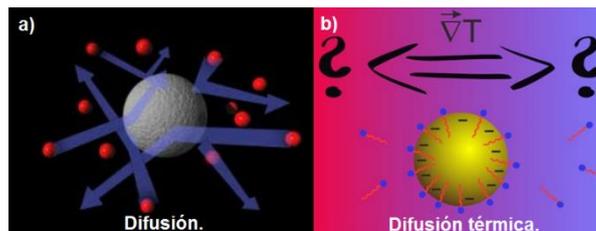


Fig. 23 a) Influencia del movimiento molecular de un fluido sobre la moción de una partícula, usualmente descrito por el movimiento Browniano y el coeficiente de difusión,  $D$  y b) Una partícula expuesta a un gradiente de temperatura experimentará un movimiento que depende de las condiciones físico-químicas. Este efecto puede describirse mediante el coeficiente de difusión térmica,  $D_T$ .

## 2.7. Fotoforesis.

Este fenómeno ocurre cuando, al irradiar una suspensión (líquida o gaseosa) con energía electromagnética, las partículas suspendidas experimentan un desplazamiento que es producto de fuerzas ópticas y/o térmicas, siendo estas últimas el resultado de una conversión luz-calor derivada de la absorción de energía radiante. Cuando los efectos térmicos son pequeños ante los ópticos la fotoforesis es directa, pero cuando pasa lo contrario es indirecta.

### 2.7.1. Fotoforesis directa.

Está estrechamente vinculada a la presión de radiación, por lo tanto, solo puede ser positiva (las partículas que forman parte de la suspensión irradiada se mueven en la misma dirección de propagación del haz). Para este tipo de fotoforesis, las fuerzas de esparcimiento y de gradiente óptico influyen en la fuerza fotoforética. Considerando un haz láser de perfil Gaussiano (véase Fig. 24), la ecuación para calcular la fuerza fotoforética ejercida sobre una partícula ubicada en el centro del haz se escribe como [27]

$$F_p = \frac{2Pnr^2}{c\omega^2} Q, \quad \text{Ecuación 21}$$

donde  $P$  es la potencia láser incidente,  $n$  es el índice de refracción del medio,  $r$  es el radio de la partícula,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $\omega$  es el radio del haz láser en la posición de la partícula y  $Q$  es la eficiencia fotoforética (valor adimensional).

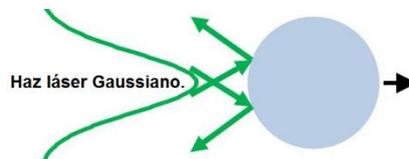


Fig. 24 Partícula que experimenta una fuerza fotoforética por un haz Gaussiano.

El término  $Q$  es la fracción de momento de la luz que puede utilizarse para generar una fuerza fotoforética. En el caso de una partícula 100% reflejante o 100% absorbente, que es iluminada por una onda plana, el valor de la eficiencia fotoforética será unitario.

Cuando una partícula esférica experimenta una fuerza fotoforética que la empuja hacia adelante, también sufre una fuerza de resistencia propia del medio circundante  $F_R$ , definiéndose esta por [27]:

$$F_R = 6\pi\eta r v, \quad \text{Ecuación 22}$$

donde  $\eta$  es la viscosidad del medio.

Así, en estado estacionario, la velocidad fotoforética de la partícula en el medio se expresa como [27]

$$v = \frac{2nPrQ}{3\pi c\omega^2\eta}, \quad \text{Ecuación 23}$$

lo que también se conoce como la ecuación general de la migración fotorforética de partículas sólidas esféricas en un medio.

Para predecir la velocidad que adquiere una partícula por acción de la fuerza fotorforética es necesario calcular el valor de  $Q$ . Esto puede lograrse ya sea mediante la teoría de rayos ópticos (RO) o la teoría de esparcimiento de Mie (MS), teorías representadas en la Fig. 25. En la primera aproximación, el haz láser se descompone en rayos ópticos individuales con las direcciones e intensidades apropiadas, después se calculan las direcciones e intensidades de los rayos refractados cuando entran en contacto con la partícula. Este método es aplicable a partículas transparentes, ya que los rayos no toman en cuenta la absorción de las partículas. La teoría del esparcimiento de Mie, por su parte, modela el haz de luz como una onda electromagnética y la interacción entre el haz y la partícula es evaluada con las ecuaciones de Maxwell. La eficiencia fotorforética se evalúa al calcular el cambio de momento de la luz incidente debida al esparcimiento y la absorción [27].

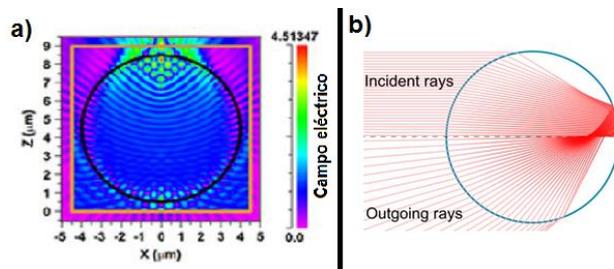


Fig. 25 Formas de modelar las fuerzas ópticas: (a) esparcimiento de Mie y (b) teoría de rayos ópticos.

### 2.7.2 Fotoforesis indirecta.

Ocurre cuando la radiación electromagnética aumenta la temperatura del medio o la superficie de la partícula que ha sido irradiada. Este calentamiento da origen a gradientes de energía interfaciales tangentes a la superficie de la partícula suspendida, provocando en ella una moción termoforética. Por esta razón, es posible denominar a estos mecanismos como fototermoforéticos [28], [29]. Se pueden observar comportamientos extraordinarios cuando a los efectos fotorforéticos se suman efectos térmicos inducidos por la misma fuente de radiación, hecho que permite una mejor manipulación de las partículas. La distribución de calor en una partícula que ha sido irradiada y se encuentra suspendida en un medio está determinada por la función de la fuente, la cual se determina como [26], [30]:

$$Q(r, \theta) = \frac{4\pi n k I}{\lambda} B(r, \theta), \quad \text{Ecuación 24}$$

donde  $Q(r, \theta)$  es la función de la fuente,  $n$  y  $k$  son las partes real e imaginaria del índice de refracción complejo de la partícula,  $I$  es la intensidad de la fuente de luz y  $B(r, \theta)$  es la función de distribución de campo eléctrico no dimensional [30].

A diferencia de la fotoforesis directa, la indirecta puede ser positiva o negativa, esto depende de las propiedades de la partícula y del medio donde está inmersa. Para explicar la ocurrencia de estos efectos generalmente se ejemplifica con dos situaciones:



- Partícula altamente absorbente de la radiación electromagnética rodeada por un fluido (positiva).
- Partícula transparente y poco absorbente de la radiación electromagnética rodeada por un fluido (negativa).

Además, en ambos casos se considera que el índice de refracción de la partícula es mayor que el del medio circundante.

### 2.7.2.1 Fotoforesis indirecta positiva.

Cuando la partícula es altamente absorbente en la longitud de onda con la que se irradia su hemisferio expuesto a la luz capta su energía transformándola en calor. Este calor se distribuye de forma no uniforme hacia el interior de la partícula como en la Fig. 26. De esta forma, la fuerza radiométrica generada impulsa la partícula en la misma dirección de propagación de los rayos (lejos de la fuente de luz). Ya que es imprescindible que la región intensa de calor se concentre en la superficie de la partícula y del medio circundante, la fotoforesis positiva ocurre solo en partículas opacas, así transmiten una menor cantidad de luz imposibilitando que esta atraviese la partícula y aumentando su energía térmica.

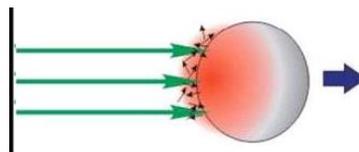


Fig. 26 En la fotoforesis indirecta positiva el objeto irradiado se desplaza en la misma dirección de propagación del haz.

### 2.7.2.2. Fotoforesis indirecta negativa.

Por su parte, la fotoforesis indirecta negativa ocurre en partículas esféricas transparentes o semitransparentes de baja absorción porque transmiten y enfocan la radiación en la parte posterior de la partícula como se representa en la Fig. 27. Así aumenta el calor en esta región y se genera un gradiente de temperatura que impulsará la partícula en dirección contraria a la dirección de propagación de los rayos.

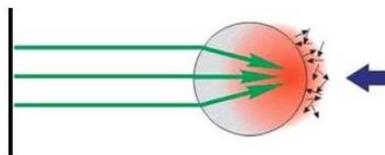


Fig. 27 En la fotoforesis indirecta negativa el objeto irradiado se desplaza en dirección contraria a la propagación del haz.

Además de los tipos básicos de fotoforesis que se han mencionado en las secciones anteriores, también pueden ocurrir otros tipos más excéntricos que dependen de las condiciones del medio y de las propiedades de las partículas. Algunos ejemplos de estas especies son la gravitofotoforesis [31], magnetofotoforesis [31], electrofotoforesis

[31], la fotoforesis circular [31], la fotoforesis de tipo  $\Delta T$  [32] y la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  [32], estas dos últimas serán descritas a continuación ya que son una generalización de las fuerzas fotoforéticas indirectas

### 2.7.2.3. Fotoforesis de tipo $\Delta T$ .

También conocida como fotoforesis de primer tipo [33], la fotoforesis de tipo  $\Delta T$  es una fuerza longitudinal (que provoca desplazamientos lineales), cuya existencia resulta de la distribución no uniforme de calor en la superficie de una partícula irradiada, luego de que esta haya transformado la energía electromagnética en térmica por medio del proceso de absorción.

La moción provocada por este tipo de fotoforesis puede variar de acuerdo a parámetros físicos definidos por las características de las partículas (tamaño, composición, transparencia u opacidad, etc), del medio circundante (presión, densidad molecular), o de las interacciones partícula-medio (coeficiente de acomodación, temperatura). La influencia de algunos de estos parámetros físicos en el movimiento fotoforético de tipo  $\Delta T$  serán descritos a continuación.

#### Moción en partículas esféricas transparentes.

Cuando la partícula irradiada es ligeramente absorbente y su tamaño es comparable a la longitud de onda, esta refractará los rayos que le llegan de tal forma que se enfocarán en su parte posterior. Así, habrá en ese hemisferio un aumento de calor cuya distribución no es uniforme, generando una moción hacia la fuente luminosa (fotoforesis  $\Delta T$  negativa). Por otro lado, cuando la partícula transparente irradiada es más grande que la longitud de onda, los rayos refractados se concentrarán en el hemisferio expuesto a la radiación haciendo que la partícula se desplace lejos de la fuente de luz (fotoforesis  $\Delta T$  positiva). Las mociones positiva y negativa anteriormente mencionadas se representan en la Fig. 28.

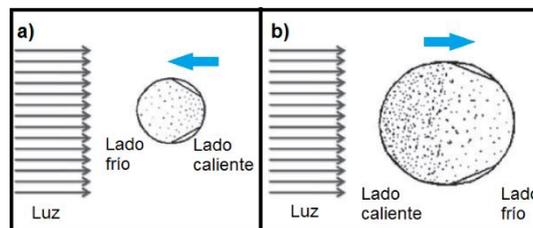


Fig. 28 Moción provocada por la fotoforesis de tipo  $\Delta T$  en partículas esféricas transparentes cuando a) la partícula es comparable a la longitud de onda y b) cuando la partícula es mucho mayor a la longitud de onda. Las flechas azules indican la dirección de desplazamiento de las partículas, mientras que los puntos negros dentro de ellas representan la tasa de producción local de calor [33].

### Moción en partículas esféricas opacas.

En caso de que estas partículas sean absorbentes de la luz con que son irradiadas, es muy común que se presente una fuerza radiométrica en el hemisferio iluminado que les impulsa lejos de la fuente luminosa (fotoforesis  $\Delta T$  positiva). Sin embargo, cuando el tamaño de la partícula es comparable a la longitud de onda de la luz, este tipo de partículas pueden actuar como transparentes, dando lugar a la fotoforesis  $\Delta T$  negativa [33].

La fotoforesis de tipo  $\Delta T$  tiene su origen en la diferencia de temperatura existente entre los hemisferios frío y caliente de una partícula. Existe una aproximación para obtener el gradiente de temperatura en una partícula que experimenta una fuerza radiométrica (el lado iluminado de la partícula es el lado donde se presenta el gradiente de temperatura), caso representado en la Fig. 29. La fórmula es la siguiente [31]:

$$\nabla T = \frac{\vec{s}}{2(k_p + k_m)}, \quad \text{Ecuación 25}$$

donde  $\vec{s}$  es la densidad de flujo de la iluminación,  $k_p$  es la conductividad térmica de la partícula y  $k_m$  es la conductividad térmica del medio.

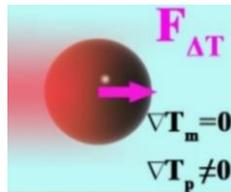


Fig. 29 La fotoforesis de tipo  $\Delta T$  es producto de una variación de temperatura en la superficie de la partícula irradiada. Aquí,  $\nabla T_m$  representa el gradiente de temperatura en el medio circundante (el cual es cero para este tipo de fotoforesis),  $\nabla T_p$  es el gradiente de temperatura en la superficie de la partícula (el cual es diferente de cero) y  $F_{\Delta T}$  representa la fuerza fotoforética de tipo  $\Delta T$  [34].

Como dato adicional, es importante puntualizar que en este tipo de fotoforesis las moléculas del medio circundante adquieren muy poca o nula energía del hemisferio caliente, es decir, cuando colisionan con la superficie de la partícula, estas son reflejadas con la misma velocidad que tenían antes del impacto. Es por esta razón que el coeficiente de acomodación térmica es constante alrededor de toda la partícula.

#### **2.7.2.4. Fotoforesis de tipo $\Delta\alpha$ .**

La fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  ocurre principalmente cuando la conversión luz-calor provocada por las partículas irradiadas es tan fuerte que una gran parte de esta energía térmica se difunde hacia el medio circundante. En el caso de la fotoforesis  $\Delta T$ , esa transformación de energía es menos intensa, por lo que el calor se distribuye principalmente sobre la superficie y dentro de la partícula. Siguiendo este orden de ideas, es evidente que en la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  se presentan dos fenómenos de naturaleza térmica: la fotoforesis, que es el gradiente de temperatura distribuido por la partícula y la termoforesis, que es el gradiente de temperatura distribuido por el medio circundante que está en la vecindad del hemisferio irradiado de la partícula [34].

Tanto la fotoforesis como la termoforesis juegan un papel crucial en cómo se moverá una partícula por acción térmica. Entonces, es necesario considerar el aporte de cada uno de ellos. Una forma de hacer esto es analizando el fenómeno térmico desde una perspectiva molecular. El calor es un incremento en la frecuencia de oscilación de los átomos que conforman a las moléculas como respuesta a la absorción de energía. Dado que en el caso de la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  existe un gradiente de temperatura en la partícula y otro en el medio circundante, las moléculas que los conforman se mueven con mayor velocidad dando paso a un intercambio de momento entre el medio y la partícula (véase la Fig. 30). Este intercambio de momento puede caracterizarse usando el coeficiente de acomodación térmica,  $\alpha$ , el cual se define por [34]

$$\alpha = \frac{T_r - T_i}{T_s - T_i}, \quad \text{Ecuación 26}$$

donde  $T_r$  es la temperatura emitida por la partícula después del intercambio de momento,  $T_i$  es la temperatura de las moléculas del medio circundante expuesto al hemisferio caliente de la partícula y  $T_s$  es la temperatura de la superficie de la partícula.

La moción de partículas por fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  depende de la diferencia del intercambio de momento entre la partícula y las moléculas del medio circundante, es decir, el coeficiente de acomodación,  $\alpha$ , de ahí proviene su nombre. De acuerdo al valor de  $\alpha$ , el movimiento de la partícula puede ser atractivo respecto a la fuente de luz o repulsivo, es decir, negativo o positivo.

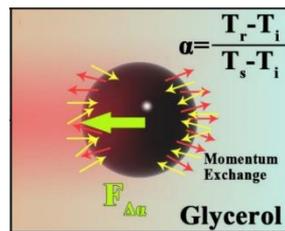


Fig. 30 Fuerzas que actúan sobre una partícula altamente absorbente. Las flechas rojas indican el intercambio de momento ejercido por las moléculas de la partícula sobre el medio circundante, mientras que las amarillas representan el intercambio de momento ejercido por las moléculas del medio hacia la partícula. La flecha verde es la fuerza fotoforética de tipo  $\Delta\alpha$  [34].

## Capítulo 3: Desarrollo experimental.

En este capítulo se da a conocer la metodología implicada en la elaboración del trabajo en laboratorio tomando en cuenta las principales técnicas y mecanismos utilizados.

En la sección subsecuente se explica el procedimiento a seguir para realizar la técnica de fotodeposición, se presenta el arreglo óptico que permite visualizar a las partículas bajo estudio y, finalmente, se describe la composición y fabricación de las celdas cuya función es contener la suspensión estudiada.

Además de proporcionar los detalles antes mencionados es importante recalcar que se analizaron tres tipos de suspensiones:

- Partículas dieléctricas de poliestireno de látex con tamaño de 1 micra disueltas en agua destilada.
- Partículas dieléctricas de poliestireno de látex con tamaño de 3 micras disueltas en agua destilada.
- Partículas metálicas de plata con tamaño de 1 micra disueltas en agua destilada.

Estas suspensiones fueron elaboradas dentro de un microtubo al mezclar el tipo de partícula deseada con agua destilada. Ya que se requiere una distribución uniforme de las partículas en el agua, las mezclas contenidas en sus respectivos microtubos pasaron por un baño ultrasónico, proceso generado por una máquina dentro de la cual se debe colocar agua. La función de esta máquina es emitir ondas ultrasónicas que causan perturbaciones en el líquido en cuestión, haciendo que estas golpeen a los microtubos sumergidos. Así, las partículas se desplazan de tal forma que se logra una distribución más uniforme.

### 3.1. Migración de partículas dieléctricas.

Como ya se mencionó anteriormente, la etapa experimental en el caso de la manipulación de partículas dieléctricas conlleva la implementación de la técnica de fotodeposición para inmovilizar nanopartículas de plata en la punta de la fibra óptica, la observación del comportamiento inducido por radiación láser en las partículas ante el gradiente de temperatura y la fabricación de la celda. A continuación, se explican estos procedimientos.

### 3.1.1. Fotodeposición.

El objetivo principal de realizar esta técnica es incluir un material especial (nanopartículas de plata) en la fibra óptica para transformar la energía electromagnética en calor y provocar un movimiento por termoforesis en las partículas dieléctricas.

#### Materiales para la fotodeposición.

- Fuente láser de estado sólido, marca BWTEK, modelo BWF1, con longitud de onda de 455 nm.
- Fibra óptica monomodo para longitudes de onda de 633-780 nm (multimodo para  $\lambda = 455$  nm), con un diámetro de 125  $\mu\text{m}$ , marca THORLABS, modelo SM-600.
- Nanopartículas de plata en forma de polvo con tamaños variables no mayores a 100 nm, marca Sigma-Aldrich, con número de producto 576832.
- Alcohol desnaturalizado.
- Fotodetector de espectro visible, marca NEWPORT, modelo 918-SL.
- Medidor de potencia óptica, marca NEWPORT, modelo 2935T-C.
- Baño ultrasónico, marca Ultrasonic Cleaner, modelo SB 120-DTN.

#### Metodología de la fotodeposición.

El primer paso para llevar a cabo la técnica es confinar el haz láser en la fibra óptica. Luego se sumerge el extremo por donde sale la luz en la mezcla saturada, véase Fig. 31 (cabe mencionar que dicha mezcla también fue sometida al proceso de baño ultrasónico). Ya que las partículas de plata son absorbentes de la longitud de onda del láser, éstas experimentarán una fuerza atrayente hacia la punta de la fibra ocasionando que se adhieran en su cara.

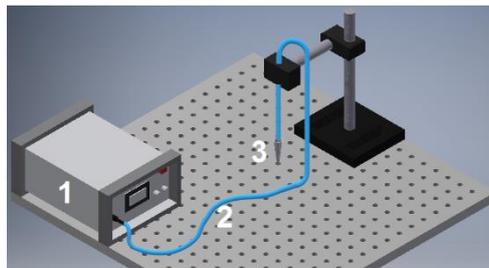


Fig. 31 Arreglo experimental para realizar la fotodeposición, donde 1 es la fuente láser, 2 es la fibra óptica y 3 es el microtubo que contiene la suspensión de nanopartículas de plata.

El propósito de realizar la fotodeposición es aumentar el calor en la siguiente etapa del experimento para provocar la migración de las partículas dieléctricas de poliestireno de látex. Como estas partículas no son absorbentes en la longitud de onda azul se requiere que el láser sea de mayor potencia para causar el efecto de moción por fotoforesis indirecta negativa. La fuente láser dispuesta para tal propósito no entrega la potencia necesaria y es por eso que se lleva a cabo la fotodeposición de nanopartículas de plata en la punta de la fibra. Luego de la fotodeposición se puede generar energía calorífica en las regiones de la fibra que tengan partículas adheridas, como se aprecia en la Fig.

32, una vez que se enciende el láser. El aumento de energía que una fibra óptica puede ocasionar después de haber sido fotodepositada depende directamente de la cantidad de partículas metálicas adheridas. Por el contrario, la cantidad de luz que sale de la fibra óptica será menor mientras mayor sea el número de partículas fotodepositadas, lo que conlleva a cierta pérdida de intensidad luminosa o atenuación. La expresión que describe este comportamiento es

$$atn = 10 \log \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right), \quad \text{Ecuación 27}$$

donde  $atn$  es la atenuación en decibelios,  $P_{in}$  es la potencia de entrada (antes de la fotodeposición) y  $P_{out}$  es la potencia de salida (después de la fotodeposición).

Para saber qué pérdida se obtenía en cada experimento se empleó la fórmula anterior y se tomó lectura de las potencias de entrada y salida con ayuda de un detector de radiación visible conectado a un medidor de potencia. En la siguiente figura se observa que las nanopartículas se adhieren en toda la cara de la fibra óptica habiendo un mayor cantidad de ellas en el centro

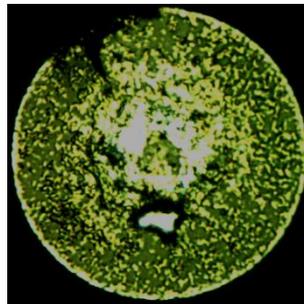


Fig. 32 Cara fotodepositada de la fibra óptica.

## 3.2. Esquema experimental para la migración masiva de micropartículas dieléctricas.

### Materiales para el arreglo experimental.

- Láser de estado sólido, marca BWTEK, modelo BWF1, con longitud de onda de 455 nm.
- Fibra óptica monomodo para longitudes de onda de 633-780 nm (multimodo para  $\lambda = 455$  nm), con un diámetro de 125  $\mu\text{m}$ , marca THORLABS, SM-600.
- Celda transparente.
- Filtro óptico para bloquear radiación azul.
- Objetivo de microscopio 20x, marca MITUTOYO.
- Divisor de haz 50/50.
- Lente convergente.
- Fuente de luz blanca, tipo LED.
- 2 etapas micrométricas, marca NEWPORT.
- Detector CMOS, 2 megapíxeles, marca MOTICAM y computador para captura de imágenes y video.

### Metodología del arreglo experimental.

El arreglo experimental empleado para observar y registrar el comportamiento de las micropartículas de PS requiere que se ilumine la muestra por arriba usando un led que emite luz blanca, tal como se aprecia en la Fig. 33. Para ello se dirige la luz hacia una lente convergente de forma que ambos elementos se hallen a una distancia apropiada para generar una buena imagen. Luego esta luz se dirige hacia un divisor de haz 50/50 que está inclinado a propósito con un ángulo de 45°, de esta forma el haz luminoso reflejado por el divisor llegará al objetivo de microscopio. La luz blanca que ha pasado por el objetivo a continuación deberá pasar por un filtro de color naranja. Este elemento óptico permitirá bloquear la intensa reflexión difusa generada por el láser evitando así que se sature el detector. Ya que la luz ha atravesado el filtro ahora llegará enfocada a la celda donde se hallan las partículas y la fibra insertada. Gracias a la reflexión difusa que ocurre en este punto una porción de la luz regresa por donde vino y generará la imagen por encima del divisor de haz. En esta posición se coloca el detector CMOS, el cual está interconectado a una PC donde se reciben las imágenes. Para controlar las posiciones del objetivo de microscopio y de la fibra óptica se emplea una etapa micrométrica para cada uno.

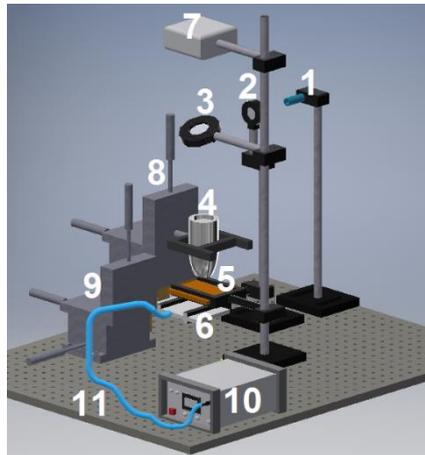


Fig. 33 Arreglo experimental para el estudio de las partículas donde 1 es la fuente de iluminación blanca (LED), 2 es una lente convergente, 3 es el divisor de haz, 4 es el objetivo de microscopio, 5 es el filtro de color, 6 es la celda, 7 es el detector CMOS, 8 y 9 son las etapas micrométricas para controlar las posiciones del objetivo y de la fibra óptica, 10 es la fuente de luz láser ( $\lambda=455$  nm) y 11 es la fibra óptica.

#### 3.2.1. Fabricación de la celda.

Un vez que ya se ha hecho la fotodeposición en la punta de la fibra óptica, el siguiente paso es colocar la suspensión a estudiar (que es la que contiene a las partículas dieléctricas) en una celda transparente que permita su observación. Esto se hace por medio de una jeringa de insulina, pues la finura de la aguja permite que esta pueda insertarse en uno de sus canales. El proceso de fabricación de la celda se expone a continuación.



### **Materiales para fabricar la celda.**

- Portaobjetos transparentes.
- Cinta doble cara.

### **Proceso de fabricación de la celda.**

La fabricación de la celda consistió en cubrir un lado de un portaobjetos de vidrio con cinta adhesiva doble cara de manera que quedara un canal donde se coloca la muestra y un canal pequeño por donde se inserta la fibra, luego se coloca otro portaobjetos sobre la cinta de doble adhesivo para cubrir el canal (véase Fig. 34) y así evitar una rápida evaporación de la muestra. Una vez que se tiene la celda con la solución dentro se introduce la fibra fotodepositada en el canal correspondiente, se enciende el láser, se observa el comportamiento de las partículas con ayuda de un arreglo óptico (el descrito en la Fig. 33) y se capturan las imágenes con una cámara CMOS.

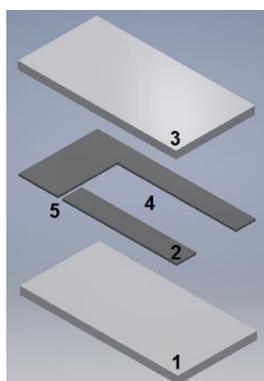


Fig. 34 Composición de la celda fabricada donde 1 es el portaobjetos inferior, 2 es la capa de cinta adhesiva doble cara, 3 es el portaobjetos superior, 4 es el canal donde se inserta la muestra y 5 es el canal donde se inserta la fibra óptica.

### **3.2.2. Condiciones experimentales.**

En total se realizaron dieciséis experimentos con partículas dieléctricas. Nueve con partículas de  $1\ \mu\text{m}$  y siete con partículas de  $3\ \mu\text{m}$ . Las condiciones experimentales dependieron de dos parámetros controlables: la pérdida de potencia óptica (en dB) generada por la obstrucción de la luz en la cara de la fibra óptica luego de que se le adhirieran nanopartículas de plata por efectos de la fotodeposición y la potencia de operación del láser (en mW). A continuación, se describen los experimentos realizados en la siguiente tabla.

Experimentos realizados con partículas dieléctricas de 1 $\mu\text{m}$ .		
	Pérdida óptica (atenuación).	Potencia de operación.
Experimento 1	4 dB	20 mW
Experimento 2	4 dB	43 mW
Experimento 3	4 dB	72 mW
Experimento 4	6 dB	20 mW
Experimento 5	6 dB	43 mW
Experimento 6	6 dB	72 mW
Experimento 7	8 dB	20 mW
Experimento 8	8 dB	43 mW
Experimento 9	8 dB	72 mW
Experimentos realizados con partículas dieléctricas de 3 $\mu\text{m}$ .		
	Pérdida óptica (atenuación).	Potencia de operación.
Experimento 10	2 dB	20 mW
Experimento 11	2 dB	105 mW
Experimento 12	2 dB	200 mW
Experimento 13	3 dB	20 mW
Experimento 14	3 dB	105 mW
Experimento 15	4 dB	20 mW
Experimento 16	4 dB	105 mW

Tabla 1 Condiciones experimentales para las partículas dieléctricas de poliestireno de látex.

### 3.3. Esquema experimental para la migración de partículas metálicas.

El arreglo óptico que permitió observar el comportamiento de las microesferas de plata bajo el influjo de la radiación láser fue el mismo que se utilizó en el caso de las partículas dieléctricas (véase Fig. 33). Sin embargo, hay una variante que es importante mencionar. Como ya se ha recalcado a lo largo de este estudio, la plata es un material altamente absorbente de la radiación azul (en este caso  $\lambda = 455 \text{ nm}$ ). Es por esta razón que no se requiere fotodepositar nanopartículas metálicas en la punta de la fibra óptica para observar una moción en las partículas metálicas bajo análisis. Así pues, solo se hacen los procedimientos típicos como pelar y cortar la fibra para, posteriormente, medir la potencia de luz que ésta entrega y establecer la cantidad deseada. Finalmente, el extremo de la fibra en cuestión se introduce en la celda y se posiciona con ayuda de las etapas micrométricas de tal forma que aparezca en la imagen proporcionada por el sistema óptico.

#### 3.3.1. Condiciones experimentales.

Para provocar un desplazamiento en las partículas metálicas no fue necesario aplicar la técnica de fotodeposición, por lo que el único parámetro controlable fue la potencia de operación del láser empleando las magnitudes siguientes.

Experimentos realizados con partículas metálicas de 1 $\mu\text{m}$ .	
	Potencia de operación.
Experimento 17	110 mW
Experimento 18	204 mW

Tabla 2 Condiciones experimentales para las partículas metálicas de plata.

## Capítulo 4: Resultados y discusión.

Una vez que se comprobó la migración de las partículas ya sea dieléctricas o metálicas surgieron retos tales como encontrar las condiciones adecuadas que optimizaran el procedimiento y determinar la influencia de ciertos parámetros controlables sobre el comportamiento de las partículas. Con ayuda de las videograbaciones hechas durante la experimentación se hicieron tres tipos de análisis: “cálculo de las distancias recorridas por las partículas por unidad de tiempo”, “Obtención de la velocidad instantánea en función de la posición respecto de la fibra óptica” y “conteo de aglomerados por unidad de tiempo”. Dado que cada experimento se realizó bajo condiciones específicas; es decir, con diferentes cantidades de nanopartículas adheridas en la cara de la fibra óptica (lo que se cuantifica como una atenuación de potencia óptica en decibeles) y con diferentes potencias de operación del láser (cuantificadas en miliwatts), en total se estudiaron dieciocho videos, siete que corresponden a las partículas dieléctricas de PS de 3 micras, nueve que corresponden a las partículas dieléctricas de PS de 1 micra y dos que corresponden a las partículas metálicas de plata de 1 micra.

### 4.1. Resultados de la migración de micropartículas dieléctricas.

A lo largo de esta tesis se ha comentado constantemente que al realizar la fotodeposición de partículas de plata en la cara de la fibra óptica y luego irradiarlas por medio de una fuente láser de 455 nm se crea una conversión de energía electromagnética a calorífica. También se ha comentado que esta energía es la responsable de inducir una moción en las partículas de PS al suscitarse el fenómeno de termoforesis, el cual ejerce una fuerza termoforética sobre ellas. En la práctica, la realidad es que la fuerza termoforética no es la única que influye en el comportamiento de las partículas, hay otras variables físicas como la fricción con el fondo de la celda y la flotabilidad en el agua que pueden ralentizar o acelerar su movimiento (véase Fig. 35). Para entender mejor esta aseveración hay que analizar dos casos extremos: la ausencia de fricción y la ausencia de flotabilidad. Cabe aclarar que ambas situaciones solo consideran la contribución de la fricción con el fondo de la celda, puesto que la fricción de las partículas con el medio huésped (agua) es una característica presente en ambos casos y cuya contribución se manifiesta como una fuerza de arrastre.

El primer caso, que es la ausencia de fricción, ocurre cuando la partícula se encuentra suspendida en el líquido, es decir, cuando no se ha precipitado al fondo de la celda. Si

bajo estas condiciones se ejerce la fuerza termoforética, la velocidad de la partícula solo se verá limitada por la fricción con el medio huésped (fuerza de arrastre) y, por supuesto, por la magnitud de la misma fuerza termoforética. Por el contrario, se considera que hay ausencia de flotabilidad cuando la partícula se ha precipitado hasta el fondo de la celda pero sin adherirse. De este modo, cuando la fuerza termoforética entra en acción, el desplazamiento de la partícula se verá afectado por la fricción con la celda y su velocidad tendrá que disminuir, recuérdese que la fricción es una oposición al movimiento.

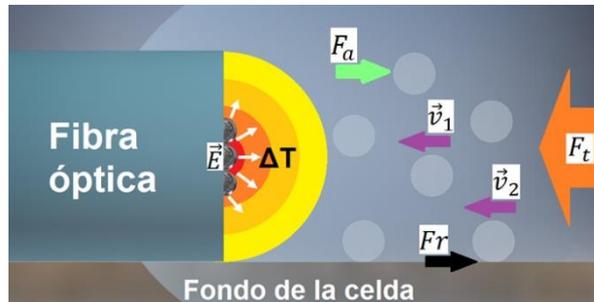


Fig. 35 Esquema ilustrativo de las fuerzas presentes en la migración por termoforesis, donde  $\vec{E}$  es la dirección de propagación de la luz,  $F_t$  es la fuerza termoforética,  $F_a$  es la fuerza de arrastre y  $F_r$  es la fricción. Note que, debido a la fricción con la celda en las partículas precipitadas, la velocidad tendrá que ser menor comparada con el caso donde no hay fricción con la celda, por lo que es lógico que  $\vec{v}_1 > \vec{v}_2$ .

Hasta ahora se ha explicado de forma general la influencia de ciertas variables físicas sobre el movimiento de las partículas, pero se requiere un análisis cuantitativo para estudiar a profundidad ese movimiento. Para ello se hacen los análisis numéricos referidos en las secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 para cada experimento. Dichos experimentos se hicieron al fotodepositar diferentes cantidades de nanopartículas de plata en la punta de la fibra óptica, las cuales provocarán diferentes atenuaciones medidas en decibeles. Además, para cada fotodeposición se propagará la luz láser dentro de la fibra óptica con una potencia de luz específica (medida en mW), tanto para las partículas dieléctricas de 1 micra como para las de 3 micras, las cuales se encontraban disueltas en agua destilada. Los resultados obtenidos por medio de los análisis cuantitativos se muestran a continuación.

#### 4.1.1. Distancias recorridas por las partículas por unidad de tiempo.

En primer lugar, se hizo una selección de cinco partículas en cada video y se rastrearón por intervalos de tiempo. Para esto se capturó el cuadro al inicio del recorrido de la partícula y se registró su posición en pixeles. Posteriormente se captura otro cuadro del video cuando en él ha transcurrido cierto tiempo y se registra la nueva posición de la partícula en pixeles. Las capturas de estos cuadros y el registro de las posiciones de las partículas se siguen realizando hasta que estas llegan a las proximidades de la fibra óptica. Una vez que se han obtenido los pixeles posición se calcula la distancia recorrida en pixeles ( $Drec_{pix}$ ) para cada intervalo de tiempo al restar el valor del pixel posición nuevo ( $P_n$ ) al valor del pixel posición de origen ( $P_o$ ).

$$Drec_{pix} = P_o - P_n, \quad \text{Ecuación 28}$$

ya que las distancias en pixeles han sido obtenidas al calcular la diferencia entre las posiciones inicial y final de la partícula se procede a transformar estos valores a micrómetros. Para ello se toma como referencia el tamaño promedio en pixeles de una partícula ( $T_{part_{pix}}$ ) y se asocia a su tamaño en micras ( $T_{part_{mic}}$ ). Con esta información se aplica una sencilla regla de tres.

$$Drec_{mic} = \frac{(Drec_{pix})(T_{part_{mic}})}{T_{part_{pix}}}, \quad \text{Ecuación 29}$$

donde  $Drec_{mic}$  es la distancia recorrida en micras. En la Fig. 36 se ofrece una representación visual del rastreo de partículas para calcular su velocidad.

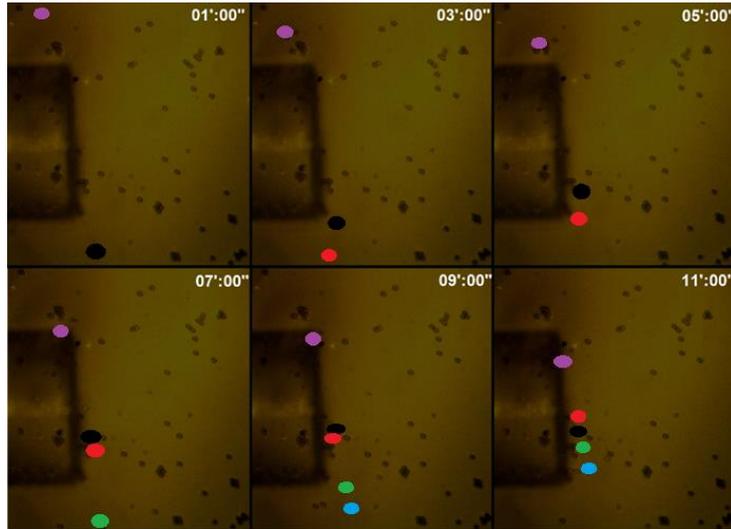


Fig. 36 Representación gráfica del rastreo de las partículas seleccionadas por instantes iguales de tiempo. Los puntos coloreados representan las posiciones de las partículas rastreadas (morado: partícula 1, negro: partícula 2, rojo: partícula 3, verde: partícula 4, cian: partícula 5).

#### 4.1.1.1. Resultados obtenidos para las partículas de PS de 1 micra (experimentos del 1 al 9).

Los resultados mostrados en esta subsección fueron obtenidos utilizando potencias del láser de 20, 43 y 72 mW y para fotodeposiciones de partículas de plata que provocaron una pérdida en potencia de 4, 6 y 8 dB. Los resultados cuantitativos se presentan a continuación de acuerdo a la tabla 1. La tabla 3 da a conocer las velocidades que alcanzaron las partículas en cada experimento y las distancias recorridas por ellas.

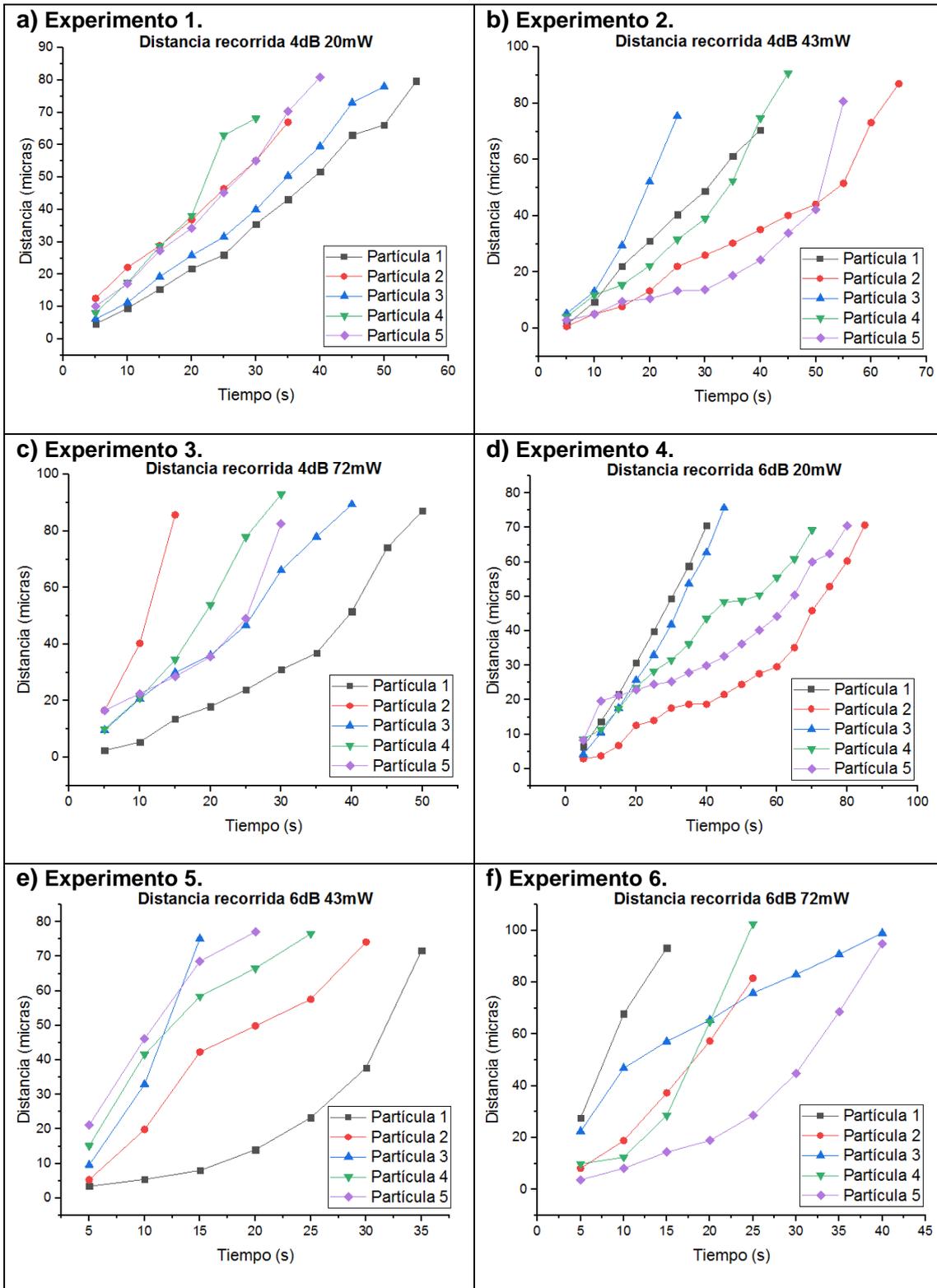


Fig. 37 Gráficos que describen las distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser ( $P$ ) de 20 mW empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida ( $atn$ ) de 4dB, b) donde  $P= 43$  mW y  $atn= 4$ dB, c) con  $P=72$  mW y  $atn= 4$ dB, d) cuando  $P= 20$ mW y  $atn= 6$ dB, e) donde  $P= 43$  mW y  $atn=6$  dB y f) con  $P=72$  mW y  $atn=6$  dB.

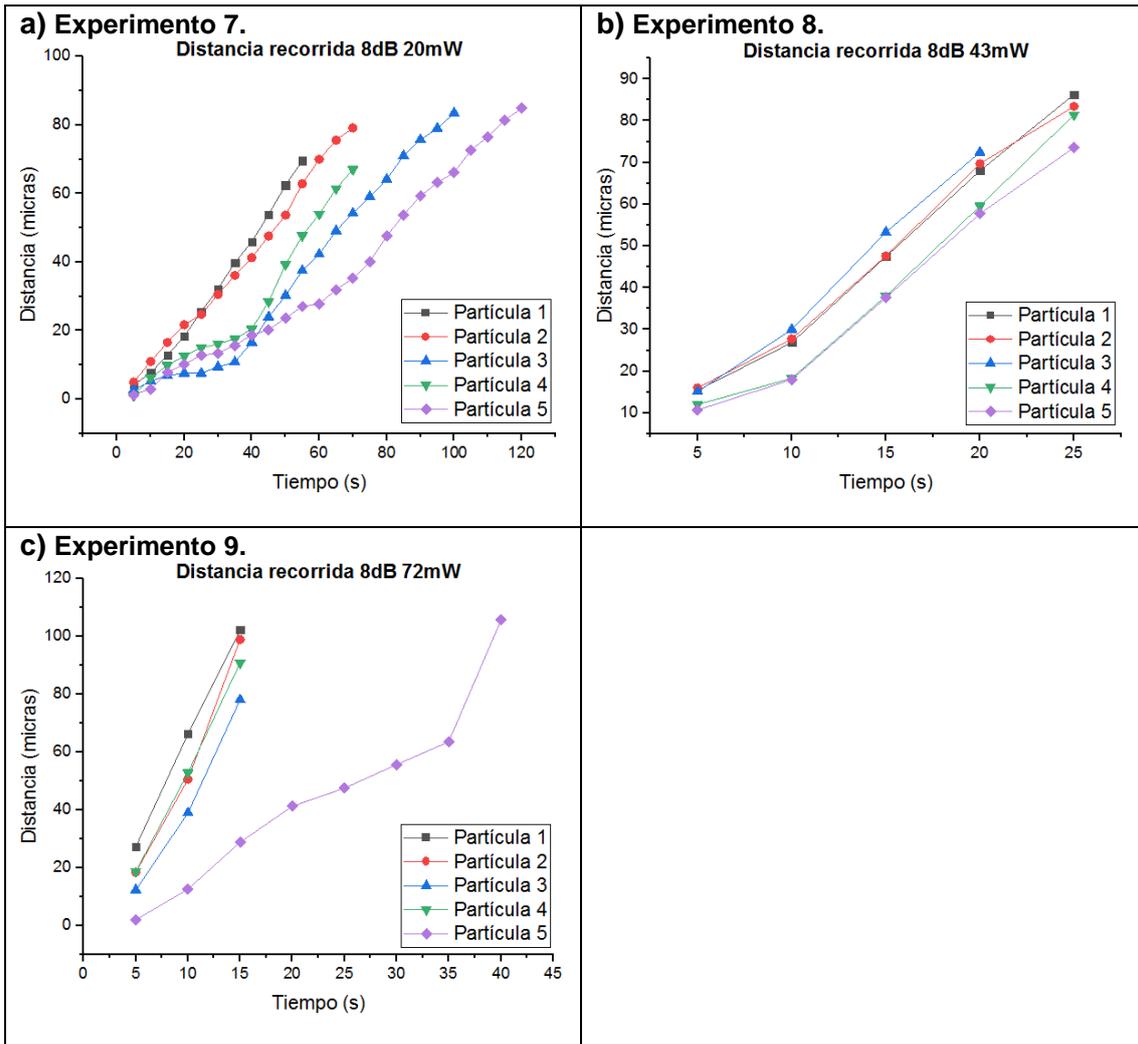


Fig. 38 Gráficos que describen las distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 8 dB. b) donde P= 43 mW y atn= 8 dB y c) con P=72 mW y atn= 8dB.

<p>a)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 1.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>86.96 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>79.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>114.85 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>67 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>93.6 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>78 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>136.28 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>68.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>121.28 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>80.85 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	86.96 $\mu\text{m}/\text{min}$	79.71 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	114.85 $\mu\text{m}/\text{min}$	67 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	93.6 $\mu\text{m}/\text{min}$	78 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	136.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	68.14 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	121.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	80.85 $\mu\text{m}$	<p>b)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 2.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>105.64 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>70.42 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>80.3 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>87 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>181.02 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>75.42 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>120.95 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>90.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>88.05 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>80.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	105.64 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.42 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	80.3 $\mu\text{m}/\text{min}$	87 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	181.02 $\mu\text{m}/\text{min}$	75.42 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	120.95 $\mu\text{m}/\text{min}$	90.71 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	88.05 $\mu\text{m}/\text{min}$	80.71 $\mu\text{m}$
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	86.96 $\mu\text{m}/\text{min}$	79.71 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	114.85 $\mu\text{m}/\text{min}$	67 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	93.6 $\mu\text{m}/\text{min}$	78 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	136.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	68.14 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	121.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	80.85 $\mu\text{m}$																																			
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	105.64 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.42 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	80.3 $\mu\text{m}/\text{min}$	87 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	181.02 $\mu\text{m}/\text{min}$	75.42 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	120.95 $\mu\text{m}/\text{min}$	90.71 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	88.05 $\mu\text{m}/\text{min}$	80.71 $\mu\text{m}$																																			
<p>c)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 3.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>104.57 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>87.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>342.85 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>85.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>134.14 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>89.42 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>186 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>93 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>165.14 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>82.57 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	104.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	87.14 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	342.85 $\mu\text{m}/\text{min}$	85.71 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	134.14 $\mu\text{m}/\text{min}$	89.42 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	186 $\mu\text{m}/\text{min}$	93 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	165.14 $\mu\text{m}/\text{min}$	82.57 $\mu\text{m}$	<p>d)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 4.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>105.85 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>70.57 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>49.91 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>70.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>100.95 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>75.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>59.38 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>69.28 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>52.92 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>70.57 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	105.85 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.57 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	49.91 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.71 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	100.95 $\mu\text{m}/\text{min}$	75.71 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	59.38 $\mu\text{m}/\text{min}$	69.28 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	52.92 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.57 $\mu\text{m}$
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	104.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	87.14 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	342.85 $\mu\text{m}/\text{min}$	85.71 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	134.14 $\mu\text{m}/\text{min}$	89.42 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	186 $\mu\text{m}/\text{min}$	93 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	165.14 $\mu\text{m}/\text{min}$	82.57 $\mu\text{m}$																																			
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	105.85 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.57 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	49.91 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.71 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	100.95 $\mu\text{m}/\text{min}$	75.71 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	59.38 $\mu\text{m}/\text{min}$	69.28 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	52.92 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.57 $\mu\text{m}$																																			
<p>e)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 5.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>122.93 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>71.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>148.28 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>74.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>300.57 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>75.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>183.77 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>76.57 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>231.42 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>77.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	122.93 $\mu\text{m}/\text{min}$	71.71 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	148.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	74.14 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	300.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	75.14 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	183.77 $\mu\text{m}/\text{min}$	76.57 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	231.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	77.14 $\mu\text{m}$	<p>f)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 6.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>373.14 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>93.28 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>195.77 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>81.57 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>148.5 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>99 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>246.17 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>102.57 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>142.28 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>94.85 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	373.14 $\mu\text{m}/\text{min}$	93.28 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	195.77 $\mu\text{m}/\text{min}$	81.57 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	148.5 $\mu\text{m}/\text{min}$	99 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	246.17 $\mu\text{m}/\text{min}$	102.57 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	142.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	94.85 $\mu\text{m}$
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	122.93 $\mu\text{m}/\text{min}$	71.71 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	148.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	74.14 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	300.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	75.14 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	183.77 $\mu\text{m}/\text{min}$	76.57 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	231.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	77.14 $\mu\text{m}$																																			
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	373.14 $\mu\text{m}/\text{min}$	93.28 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	195.77 $\mu\text{m}/\text{min}$	81.57 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	148.5 $\mu\text{m}/\text{min}$	99 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	246.17 $\mu\text{m}/\text{min}$	102.57 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	142.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	94.85 $\mu\text{m}$																																			
<p>g)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 7.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>75.89 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>69.57 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>67.83 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>79.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>50.05 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>83.42 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>57.42 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>67 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>42.42 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>84.85 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	75.89 $\mu\text{m}/\text{min}$	69.57 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	67.83 $\mu\text{m}/\text{min}$	79.14 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	50.05 $\mu\text{m}/\text{min}$	83.42 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	57.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	67 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	42.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	84.85 $\mu\text{m}$	<p>h)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 8.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>207.08 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>86.28 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>200.22 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>83.42 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>217.28 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>72.42 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>195.42 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>81.42 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>176.57 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>73.57 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	207.08 $\mu\text{m}/\text{min}$	86.28 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	200.22 $\mu\text{m}/\text{min}$	83.42 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	217.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	72.42 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	195.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	81.42 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	176.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	73.57 $\mu\text{m}$
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	75.89 $\mu\text{m}/\text{min}$	69.57 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	67.83 $\mu\text{m}/\text{min}$	79.14 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	50.05 $\mu\text{m}/\text{min}$	83.42 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	57.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	67 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	42.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	84.85 $\mu\text{m}$																																			
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	207.08 $\mu\text{m}/\text{min}$	86.28 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	200.22 $\mu\text{m}/\text{min}$	83.42 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	217.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	72.42 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	195.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	81.42 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	176.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	73.57 $\mu\text{m}$																																			
<p>i)</p> <p><b>Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 9.</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>Partícula 1</b></td> <td>409.14 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>102.28 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 2</b></td> <td>396 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>99 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 3</b></td> <td>312.57 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>78.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 4</b></td> <td>363.42 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>90.85 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td><b>Partícula 5</b></td> <td>158.57 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>105.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>		Velocidad	Distancia	<b>Partícula 1</b>	409.14 $\mu\text{m}/\text{min}$	102.28 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 2</b>	396 $\mu\text{m}/\text{min}$	99 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 3</b>	312.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	78.14 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 4</b>	363.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	90.85 $\mu\text{m}$	<b>Partícula 5</b>	158.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	105.71 $\mu\text{m}$																			
	Velocidad	Distancia																																			
<b>Partícula 1</b>	409.14 $\mu\text{m}/\text{min}$	102.28 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 2</b>	396 $\mu\text{m}/\text{min}$	99 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 3</b>	312.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	78.14 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 4</b>	363.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	90.85 $\mu\text{m}$																																			
<b>Partícula 5</b>	158.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	105.71 $\mu\text{m}$																																			

Tabla 3 Velocidades promedio y distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 4dB, b) donde P= 43 mW y atn= 4dB, c) con P=72 mW y atn= 4dB, d) cuando P= 20mW y atn= 6dB, e) donde P= 43 mW y atn=6 dB, f) con P=72 mW y atn=6 dB, g) cuando P= 20 mW y atn= 8 dB, h) donde P= 43 mW y atn= 8 dB e i) con P=72 mW y atn= 8dB.



#### 4.1.1.2. Resultados obtenidos para las partículas de PS de 3 micras (experimentos del 10 al 16).

Los resultados mostrados en esta subsección fueron obtenidos utilizando potencias del láser de 20 y 105 mW y para fotodeposiciones de partículas de plata que provocaron una pérdida en potencia de 2, 3 y 4 dB. Los resultados cuantitativos se muestran a continuación de acuerdo con las condiciones experimentales de la tabla 1. La tabla 4 da a conocer las velocidades que alcanzaron las partículas en cada experimento y las distancias recorridas por ellas.

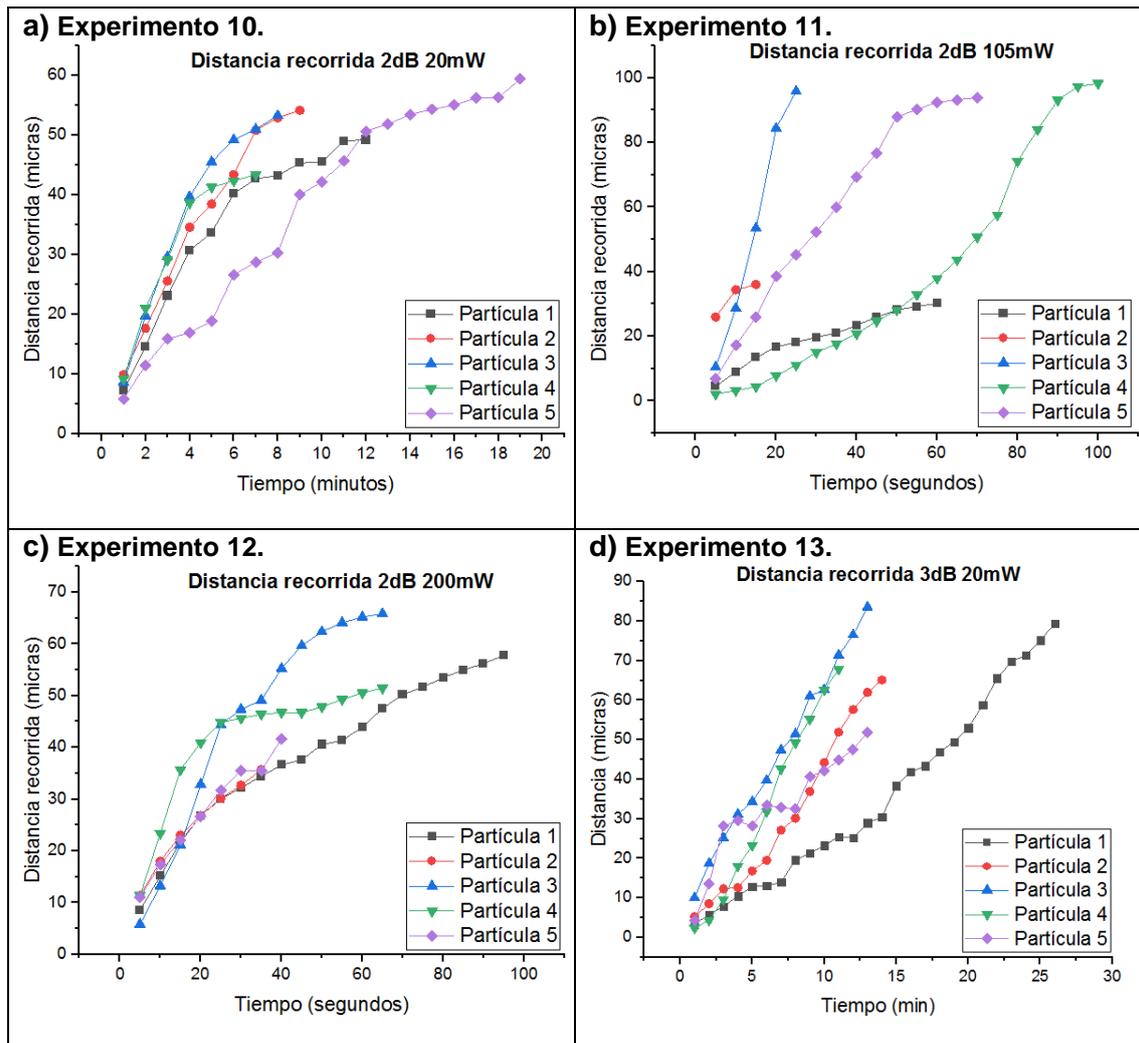


Fig. 39 Gráficos que describen las distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser ( $P$ ) de 20 mW empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida ( $\alpha_{\text{fn}}$ ) de 2 dB. b) donde  $P=105$  mW y  $\alpha_{\text{fn}}=2$  dB. c) con  $P=200$  mW y  $\alpha_{\text{fn}}=2$  dB y d) con  $P=20$  mW y  $\alpha_{\text{fn}}=3$  dB.

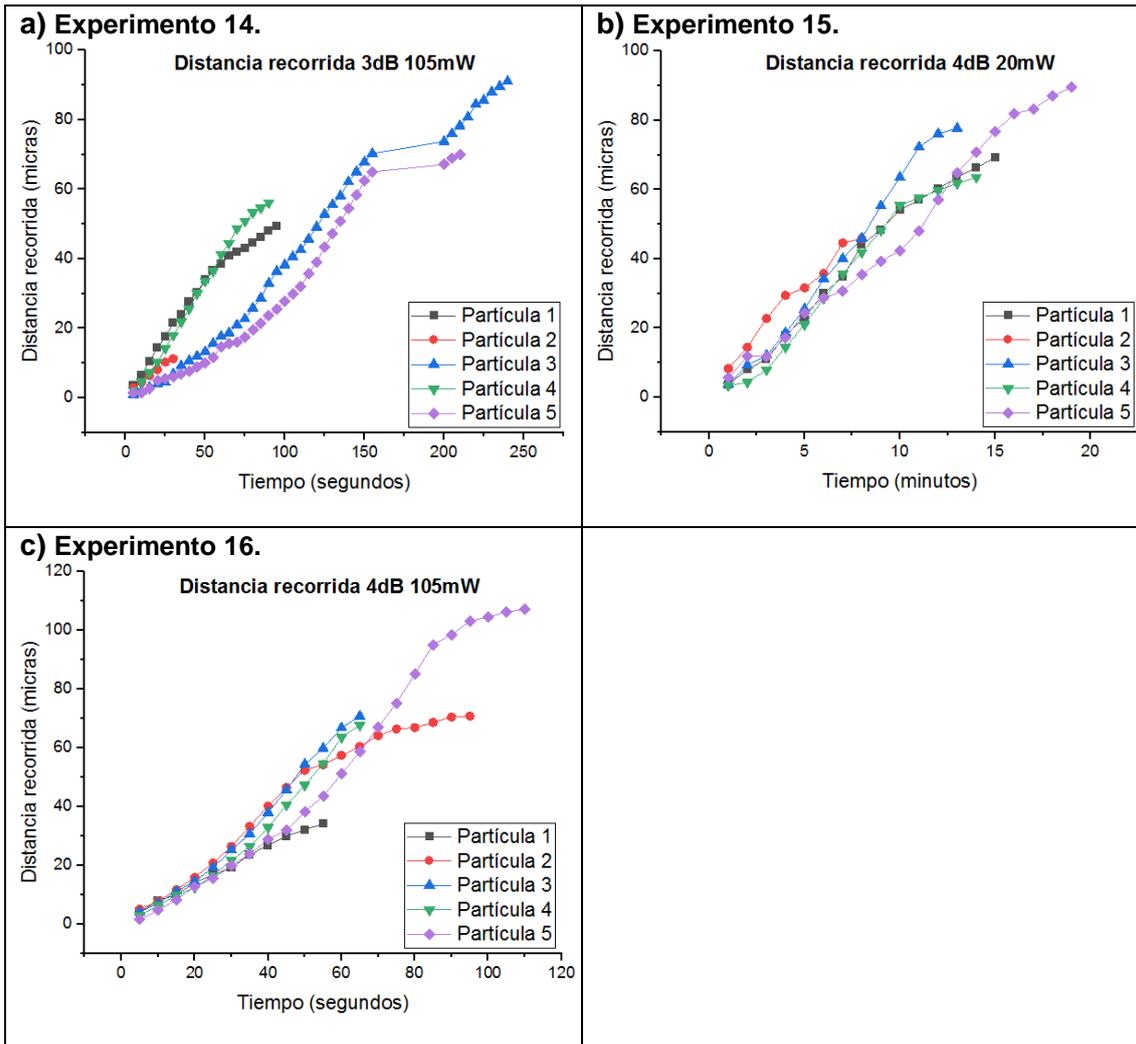


Fig. 40 Gráficos que describen las distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 105 mW empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 3 dB. b) donde P= 20 mW y atn= 4 dB y c) con P=105 mW y atn= 4 dB.

<p>a)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 10.</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Partícula 1</td> <td>4.1 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>49.23 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 2</td> <td>6.01 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>54.17 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 3</td> <td>6.66 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>53.29 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 4</td> <td>6.2 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>43.41 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 5</td> <td>3.13 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>59.47 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>	Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 10.				Velocidad	Distancia	Partícula 1	4.1 $\mu\text{m}/\text{min}$	49.23 $\mu\text{m}$	Partícula 2	6.01 $\mu\text{m}/\text{min}$	54.17 $\mu\text{m}$	Partícula 3	6.66 $\mu\text{m}/\text{min}$	53.29 $\mu\text{m}$	Partícula 4	6.2 $\mu\text{m}/\text{min}$	43.41 $\mu\text{m}$	Partícula 5	3.13 $\mu\text{m}/\text{min}$	59.47 $\mu\text{m}$	<p>b)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 11.</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Partícula 1</td> <td>30.13 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>30.13 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 2</td> <td>144 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>36 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 3</td> <td>230.07 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>95.86 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 4</td> <td>73.73 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>98.31 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 5</td> <td>80.53 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>93.95 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>	Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 11.				Velocidad	Distancia	Partícula 1	30.13 $\mu\text{m}/\text{min}$	30.13 $\mu\text{m}$	Partícula 2	144 $\mu\text{m}/\text{min}$	36 $\mu\text{m}$	Partícula 3	230.07 $\mu\text{m}/\text{min}$	95.86 $\mu\text{m}$	Partícula 4	73.73 $\mu\text{m}/\text{min}$	98.31 $\mu\text{m}$	Partícula 5	80.53 $\mu\text{m}/\text{min}$	93.95 $\mu\text{m}$
Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 10.																																											
	Velocidad	Distancia																																									
Partícula 1	4.1 $\mu\text{m}/\text{min}$	49.23 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 2	6.01 $\mu\text{m}/\text{min}$	54.17 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 3	6.66 $\mu\text{m}/\text{min}$	53.29 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 4	6.2 $\mu\text{m}/\text{min}$	43.41 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 5	3.13 $\mu\text{m}/\text{min}$	59.47 $\mu\text{m}$																																									
Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 11.																																											
	Velocidad	Distancia																																									
Partícula 1	30.13 $\mu\text{m}/\text{min}$	30.13 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 2	144 $\mu\text{m}/\text{min}$	36 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 3	230.07 $\mu\text{m}/\text{min}$	95.86 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 4	73.73 $\mu\text{m}/\text{min}$	98.31 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 5	80.53 $\mu\text{m}/\text{min}$	93.95 $\mu\text{m}$																																									
<p>c)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 12.</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Partícula 1</td> <td>36.49 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>57.78 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 2</td> <td>61.17 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>35.68 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 3</td> <td>60.77 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>65.84 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 4</td> <td>47.51 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>51.47 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 5</td> <td>62.52 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>41.68 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>	Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 12.				Velocidad	Distancia	Partícula 1	36.49 $\mu\text{m}/\text{min}$	57.78 $\mu\text{m}$	Partícula 2	61.17 $\mu\text{m}/\text{min}$	35.68 $\mu\text{m}$	Partícula 3	60.77 $\mu\text{m}/\text{min}$	65.84 $\mu\text{m}$	Partícula 4	47.51 $\mu\text{m}/\text{min}$	51.47 $\mu\text{m}$	Partícula 5	62.52 $\mu\text{m}/\text{min}$	41.68 $\mu\text{m}$	<p>d)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 13.</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Partícula 1</td> <td>3.05 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>79.35 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 2</td> <td>4.65 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>65.1 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 3</td> <td>6.42 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>83.55 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 4</td> <td>6.16 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>67.8 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 5</td> <td>4 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>51.9 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>	Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 13.				Velocidad	Distancia	Partícula 1	3.05 $\mu\text{m}/\text{min}$	79.35 $\mu\text{m}$	Partícula 2	4.65 $\mu\text{m}/\text{min}$	65.1 $\mu\text{m}$	Partícula 3	6.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	83.55 $\mu\text{m}$	Partícula 4	6.16 $\mu\text{m}/\text{min}$	67.8 $\mu\text{m}$	Partícula 5	4 $\mu\text{m}/\text{min}$	51.9 $\mu\text{m}$
Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 12.																																											
	Velocidad	Distancia																																									
Partícula 1	36.49 $\mu\text{m}/\text{min}$	57.78 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 2	61.17 $\mu\text{m}/\text{min}$	35.68 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 3	60.77 $\mu\text{m}/\text{min}$	65.84 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 4	47.51 $\mu\text{m}/\text{min}$	51.47 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 5	62.52 $\mu\text{m}/\text{min}$	41.68 $\mu\text{m}$																																									
Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 13.																																											
	Velocidad	Distancia																																									
Partícula 1	3.05 $\mu\text{m}/\text{min}$	79.35 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 2	4.65 $\mu\text{m}/\text{min}$	65.1 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 3	6.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	83.55 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 4	6.16 $\mu\text{m}/\text{min}$	67.8 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 5	4 $\mu\text{m}/\text{min}$	51.9 $\mu\text{m}$																																									
<p>e)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 14.</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Partícula 1</td> <td>31.21 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>49.42 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 2</td> <td>22.57 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>11.28 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 3</td> <td>27.3 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>91 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 4</td> <td>37.42 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>56.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 5</td> <td>24.7 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>70 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>	Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 14.				Velocidad	Distancia	Partícula 1	31.21 $\mu\text{m}/\text{min}$	49.42 $\mu\text{m}$	Partícula 2	22.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	11.28 $\mu\text{m}$	Partícula 3	27.3 $\mu\text{m}/\text{min}$	91 $\mu\text{m}$	Partícula 4	37.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	56.14 $\mu\text{m}$	Partícula 5	24.7 $\mu\text{m}/\text{min}$	70 $\mu\text{m}$	<p>f)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 15.</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Partícula 1</td> <td>4.61 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>69.27 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 2</td> <td>5.72 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>45.81 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 3</td> <td>5.97 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>77.72 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 4</td> <td>4.53 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>63.54 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 5</td> <td>4.71 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>89.59 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>	Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 15.				Velocidad	Distancia	Partícula 1	4.61 $\mu\text{m}/\text{min}$	69.27 $\mu\text{m}$	Partícula 2	5.72 $\mu\text{m}/\text{min}$	45.81 $\mu\text{m}$	Partícula 3	5.97 $\mu\text{m}/\text{min}$	77.72 $\mu\text{m}$	Partícula 4	4.53 $\mu\text{m}/\text{min}$	63.54 $\mu\text{m}$	Partícula 5	4.71 $\mu\text{m}/\text{min}$	89.59 $\mu\text{m}$
Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 14.																																											
	Velocidad	Distancia																																									
Partícula 1	31.21 $\mu\text{m}/\text{min}$	49.42 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 2	22.57 $\mu\text{m}/\text{min}$	11.28 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 3	27.3 $\mu\text{m}/\text{min}$	91 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 4	37.42 $\mu\text{m}/\text{min}$	56.14 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 5	24.7 $\mu\text{m}/\text{min}$	70 $\mu\text{m}$																																									
Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 15.																																											
	Velocidad	Distancia																																									
Partícula 1	4.61 $\mu\text{m}/\text{min}$	69.27 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 2	5.72 $\mu\text{m}/\text{min}$	45.81 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 3	5.97 $\mu\text{m}/\text{min}$	77.72 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 4	4.53 $\mu\text{m}/\text{min}$	63.54 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 5	4.71 $\mu\text{m}/\text{min}$	89.59 $\mu\text{m}$																																									
<p>g)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 16.</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Velocidad</th> <th>Distancia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Partícula 1</td> <td>37.24 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>34.14 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 2</td> <td>44.71 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>70.8 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 3</td> <td>65.4 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>70.85 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 4</td> <td>62.5 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>67.71 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> <tr> <td>Partícula 5</td> <td>58.51 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></td> <td>107.28 <math>\mu\text{m}</math></td> </tr> </tbody> </table>	Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 16.				Velocidad	Distancia	Partícula 1	37.24 $\mu\text{m}/\text{min}$	34.14 $\mu\text{m}$	Partícula 2	44.71 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.8 $\mu\text{m}$	Partícula 3	65.4 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.85 $\mu\text{m}$	Partícula 4	62.5 $\mu\text{m}/\text{min}$	67.71 $\mu\text{m}$	Partícula 5	58.51 $\mu\text{m}/\text{min}$	107.28 $\mu\text{m}$																						
Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 16.																																											
	Velocidad	Distancia																																									
Partícula 1	37.24 $\mu\text{m}/\text{min}$	34.14 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 2	44.71 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.8 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 3	65.4 $\mu\text{m}/\text{min}$	70.85 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 4	62.5 $\mu\text{m}/\text{min}$	67.71 $\mu\text{m}$																																									
Partícula 5	58.51 $\mu\text{m}/\text{min}$	107.28 $\mu\text{m}$																																									

Tabla 4 Velocidades promedio y distancias recorridas por las partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 2 dB, b) donde P= 105 mW y atn= 2 dB, c) con P= 200 mW y atn= 2dB, d) cuando P= 20 mW y atn= 3 dB, e) donde P= 105 mW y atn=3 dB, f) con P= 20 mW y atn= 4 dB y g) cuando P= 105 mW y atn= 4 dB.

### 4.1.2. Velocidad instantánea.

Este tipo de análisis consiste en calcular la velocidad de las partículas seleccionadas durante un muy breve instante de tiempo mientras se localizan a cierta distancia a partir de la cara de la fibra óptica. Para hacer esto se establecieron secciones consecutivas con una longitud de 10 micras cada una ( $\Delta d_{mic}$ ), como se aprecia en la Fig. 44 y se calculó la velocidad ( $v$ ) para las partículas cualesquiera localizadas al borde de dichas secciones. Al igual que en el tipo anterior de análisis, en este la velocidad se calcula al convertir a micras la diferencia en pixeles entre las posiciones inicial y final de la partícula de interés ( $Drec_{pix}$ ) obtenida en un intervalo de tiempo. Ahora bien, para saber cuántos pixeles equivalen a la longitud en micras deseadas para cada sección se realiza la siguiente operación:

$$\Delta d_{mic} = \frac{(\Delta d_{pix})(T_{part_{mic}})}{T_{part_{pix}}}, \quad \text{Ecuación 30}$$

donde  $\Delta d_{mic}$  es el tamaño de la sección en micras y  $\Delta d_{pix}$  es el tamaño de la sección en pixeles.

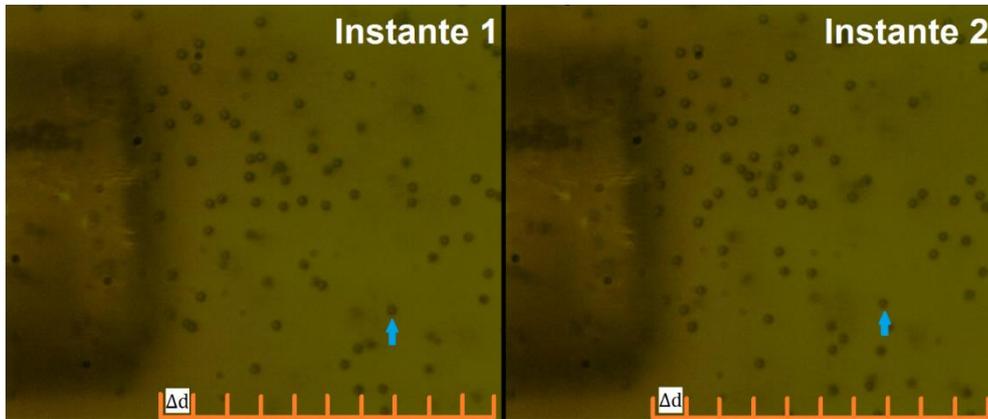


Fig. 41 Para calcular la velocidad instantánea primero se selecciona una partícula que se encuentre en el incremento  $\Delta d$  deseado y se registra su posición en pixeles en el instante 1. Posteriormente se toma su posición en el instante 2. La diferencia entre estas dos posiciones se transforma a micras y se asocia al tiempo transcurrido entre el instante 1 y el 2.

#### 4.1.2.1. Resultados obtenidos para las partículas de PS de 1 micra (experimentos del 1 al 9).

Se utilizaron potencias del láser de 20, 43 y 72 mW para fotodeposiciones de nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia de 4, 6 y 8 dB. Los resultados cuantitativos se muestran a continuación en la Fig. 42, donde se grafica la velocidad instantánea de cinco partículas arbitrarias.

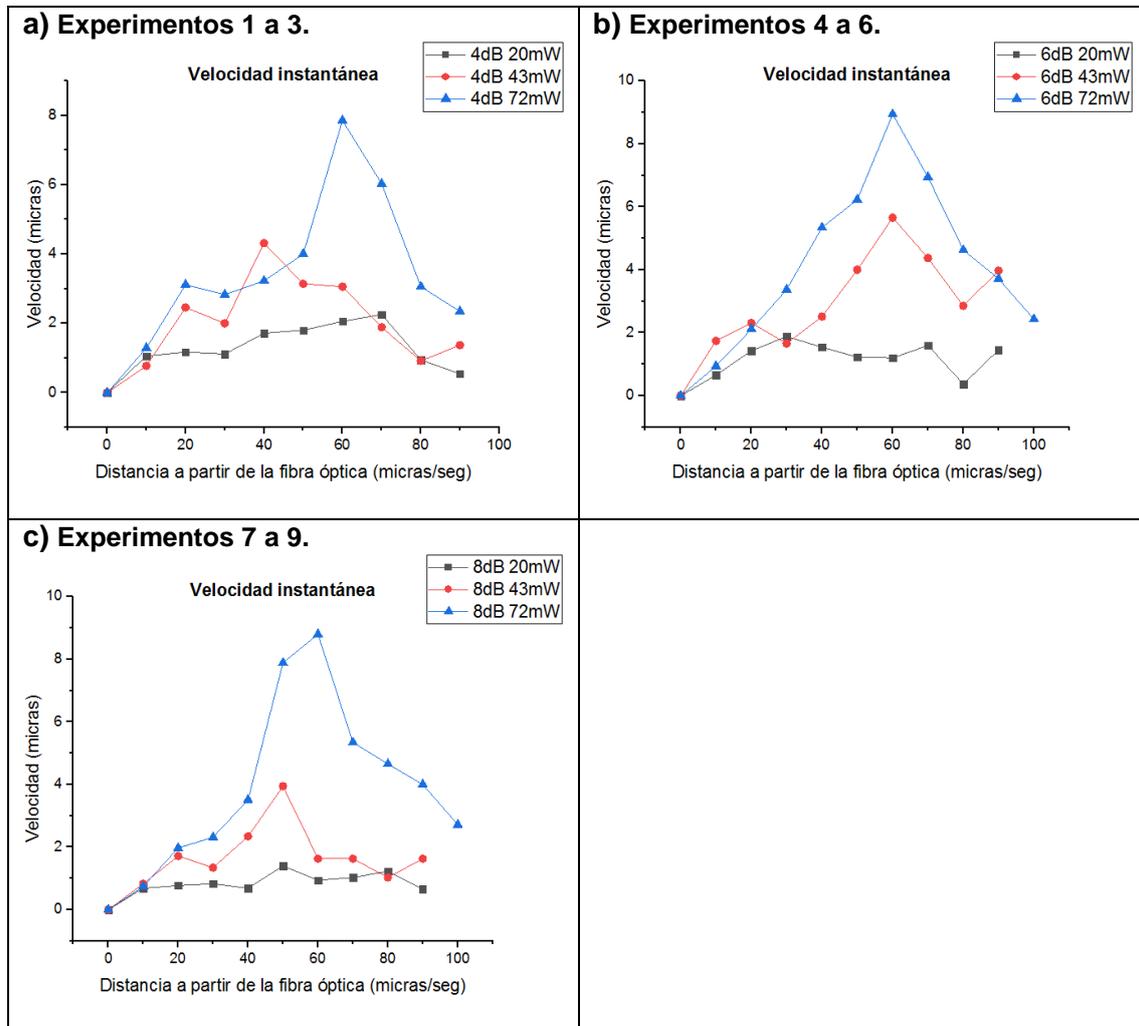


Fig. 42 Gráficos que describen las velocidades instantáneas adquiridas por las partículas de poliestireno de 1 micra cuando la fibra óptica fue fotodepositada con nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia (atn) de a) 4 dB, b) 6 dB y c) 8 dB. Las líneas trazadas dentro de cada gráfica corresponden a potencias de operación del láser de 20, 43 y 72 mW

La tabla 5 muestra las velocidades instantáneas alcanzadas por las partículas cuando estas se hallaban a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y hasta 100 micras de la fibra óptica ( $\Delta d$ ).

<b>a) Experimentos 1 a 3.</b>				<b>b) Experimentos 4 a 6.</b>			
<b>Velocidad instantánea (<math>\mu\text{m/s}</math>) con 4 dB para potencias de:</b>				<b>Velocidad instantánea (<math>\mu\text{m/s}</math>) con 6 dB para potencias de:</b>			
$\Delta d$ ( $\mu\text{m}$ )	20 mW	43 mW	72 mW	$\Delta d$ ( $\mu\text{m}$ )	20 mW	43 mW	72 mW
10	1.05	0.77	1.28	10	0.65	1.74	0.94
20	1.17	2.45	3.11	20	1.42	2.31	2.11
30	1.11	2	2.82	30	1.88	1.65	3.37
40	1.71	4.31	3.22	40	1.54	2.51	5.34
50	1.8	3.14	4	50	1.22	4	6.22
60	2.05	3.05	7.85	60	1.2	6.65	8.94
70	2.25	1.88	6.02	70	1.6	4.37	6.94
80	0.94	0.91	3.05	80	0.37	2.85	4.62
90	0.54	1.37	2.34	90	1.45	3.97	3.71
				100			2.42

<b>c) Experimentos 7 a 9.</b>			
<b>Velocidad instantánea (<math>\mu\text{m/s}</math>) con 8 dB para potencias de:</b>			
$\Delta d$ ( $\mu\text{m}$ )	20 mW	43 mW	72 mW
10	0.68	0.82	0.74
20	0.77	1.71	1.97
30	0.82	1.34	2.31
40	0.68	2.34	3.51
50	1.4	3.94	7.88
60	0.94	1.62	8.8
70	1.02	1.62	5.34
80	1.22	1.02	4.65
90	0.65	1.62	4.18
100			2.71

Tabla 5 Velocidades instantáneas experimentadas por las partículas de poliestireno de 1 micra cuando la fibra óptica fue fotodepositada con nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia (atn) de a) 4 dB, b) 6 dB y c) 8 dB. Cada tabla presenta las velocidades adquiridas para potencias de operación del láser de 20, 43 y 72 mW.

#### 4.1.2.2. Resultados obtenidos para las partículas de PS de 3 micras (experimentos 10 al 16).

Se utilizaron potencias del láser de 20 y 105 mW para fotodeposiciones de nanopartículas de plata que provocaron pérdidas en potencia de 2, 3 y 4 dB. Los resultados cuantitativos se muestran a continuación en la Fig. 43, donde se grafica la velocidad instantánea de cinco partículas arbitrarias.

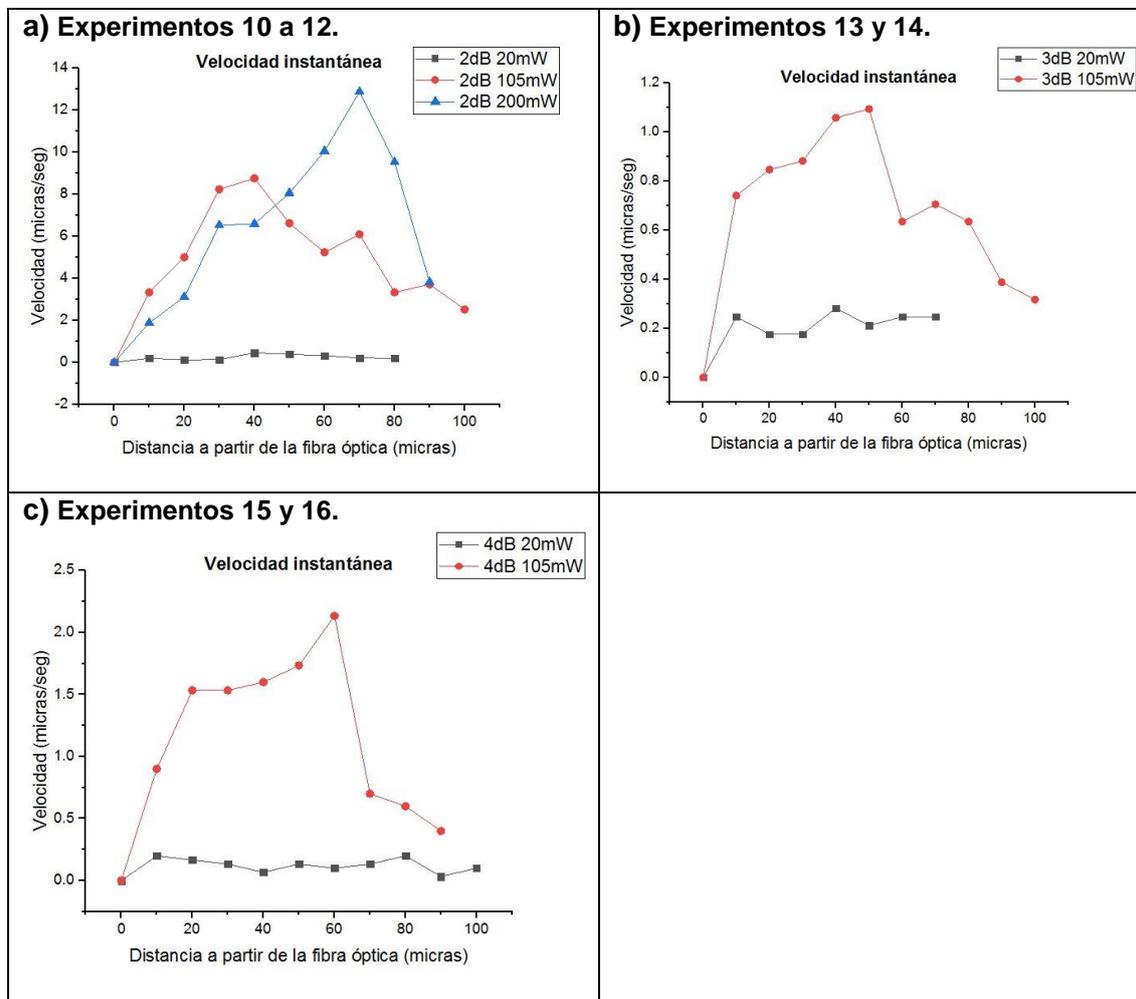


Fig. 43 Gráficos que describen las velocidades instantáneas adquiridas por las partículas de poliestireno de 3 micras cuando la fibra óptica fue fotodepositada con nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia (atn) de a) 2 dB, b) 3 dB y c) 4 dB. Las líneas trazadas dentro de cada gráfica corresponden a potencias de operación del láser de 20, 105 y 200 mW.

La tabla 6 muestra las velocidades instantáneas alcanzadas por las partículas cuando estas se hallaban a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y hasta 100 micras de la fibra óptica ( $\Delta d$ ).

<b>a) Experimentos 10 a 12.</b>				<b>b) Experimentos 13 y 14.</b>		
Velocidad instantánea ( $\mu\text{m/s}$ ) con 2 dB para potencias de:				Velocidad instantánea ( $\mu\text{m/s}$ ) con 3 dB para potencias de:		
$\Delta d$ ( $\mu\text{m}$ )	20 mW	105 mW	200 mW	$\Delta d$ ( $\mu\text{m}$ )	20 mW	105 mW
10	0.19	3.33	1.88	10	0.24	0.74
20	0.12	5	3.11	20	0.17	0.84
30	0.13	8.23	6.52	30	0.17	0.88
40	0.45	8.76	6.58	40	0.28	1.05
50	0.38	6.61	8.05	50	0.21	1.09
60	0.31	5.23	10.05	60	0.24	0.63
70	0.21	6.09	12.88	70	0.24	0.70
80	0.19	3.33	9.52	80		0.63
90		3.71	3.82	90		0.38
100		2.52		100		0.31

<b>c) Experimentos 15 y 16.</b>		
Velocidad instantánea ( $\mu\text{m/s}$ ) con 4 dB para potencias de:		
$\Delta d$ ( $\mu\text{m}$ )	20 mW	105 mW
10	0.2	0.9
20	0.16	1.53
30	0.13	1.53
40	0.06	1.6
50	0.13	1.73
60	0.1	2.13
70	0.13	0.7
80	0.2	0.6
90	0.03	0.4
100	0.1	

Tabla 6 Velocidades instantneas experimentadas por las partículas de poliestireno de 3 micras cuando la fibra óptica fue fotodepositada con nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia (atn) de a) 2 dB, b) 3 dB y c) 4 dB. Cada tabla presenta las velocidades adquiridas para potencias de operación del láser de 20 y 105 mW.

#### 4.1.3. Aglomerados por unidad de tiempo.

Para realizar este último análisis simplemente se capturó un cuadro cada cierto intervalo de tiempo y se contó el número de partículas aglomeradas en las proximidades de la fibra óptica. En el caso de las partículas dieléctricas de tres micras no hubo problema al realizar el conteo pues estas se alcanzaban a ver bien definidas, pero no ocurrió lo mismo con las partículas de 1 micra (tanto las dieléctricas como las metálicas). Para resolver esto se hizo una aproximación asociando las dimensiones en pixeles que abarca una partícula de 1 micra con las dimensiones en pixeles abarcadas por las partículas aglomeradas (véase la Fig. 44).

Dicho de otro modo, primero se calcula el número de veces ( $A$ ) que cabe la longitud del ancho de la partícula ( $l_{pix}$ ) en el ancho del área que se quiere aproximar ( $a_{pix}$ ), lo que se logra al dividir  $a_{pix}$  entre  $l_{pix}$ .



$$A = \frac{a_{pix}}{l_{pix}}. \quad \text{Ecuación 31}$$

Después se calcula el número de veces ( $B$ ) que cabe la longitud del largo de la partícula ( $l_{pix}$ ) en el largo del área que se quiere aproximar ( $b_{pix}$ ) al dividir  $b_{pix}$  entre  $l_{pix}$ .

$$B = \frac{b_{pix}}{l_{pix}}. \quad \text{Ecuación 32}$$

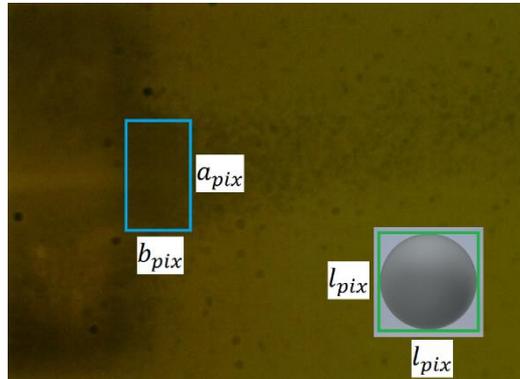


Fig. 44 Dimensiones del área de interés (recuadro azul) y de la partícula (recuadro verde) con sus respectivas notaciones.

Se denota como  $l_{pix}$  tanto al ancho como al largo de la partícula porque estas son esféricas y, por tanto, ambos valores son iguales. Luego de conocer las proporciones  $A$  y  $B$  estas se multiplican para obtener el número aproximado de partículas aglomeradas en el área de estudio ( $\#part_{agl}$ )

$$\#part_{agl} = (A)(B), \quad \text{Ecuación 33}$$

o lo que es equivalente

$$\#part_{agl} = \left(\frac{a_{pix}}{l_{pix}}\right) \left(\frac{b_{pix}}{l_{pix}}\right). \quad \text{Ecuación 34}$$

#### 4.4.3.1. Resultados obtenidos para las partículas de PS de 1 micra (experimentos del 1 al 9).

Se utilizaron potencias del láser de 20, 43 y 72 mW para fotodeposiciones de nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia de 4, 6 y 8 dB. Los resultados cuantitativos se muestran a continuación en las figuras 45 y 46, donde se grafica el número de aglomerados por unidad de tiempo en la vecindad de la fibra óptica para cada experimento.

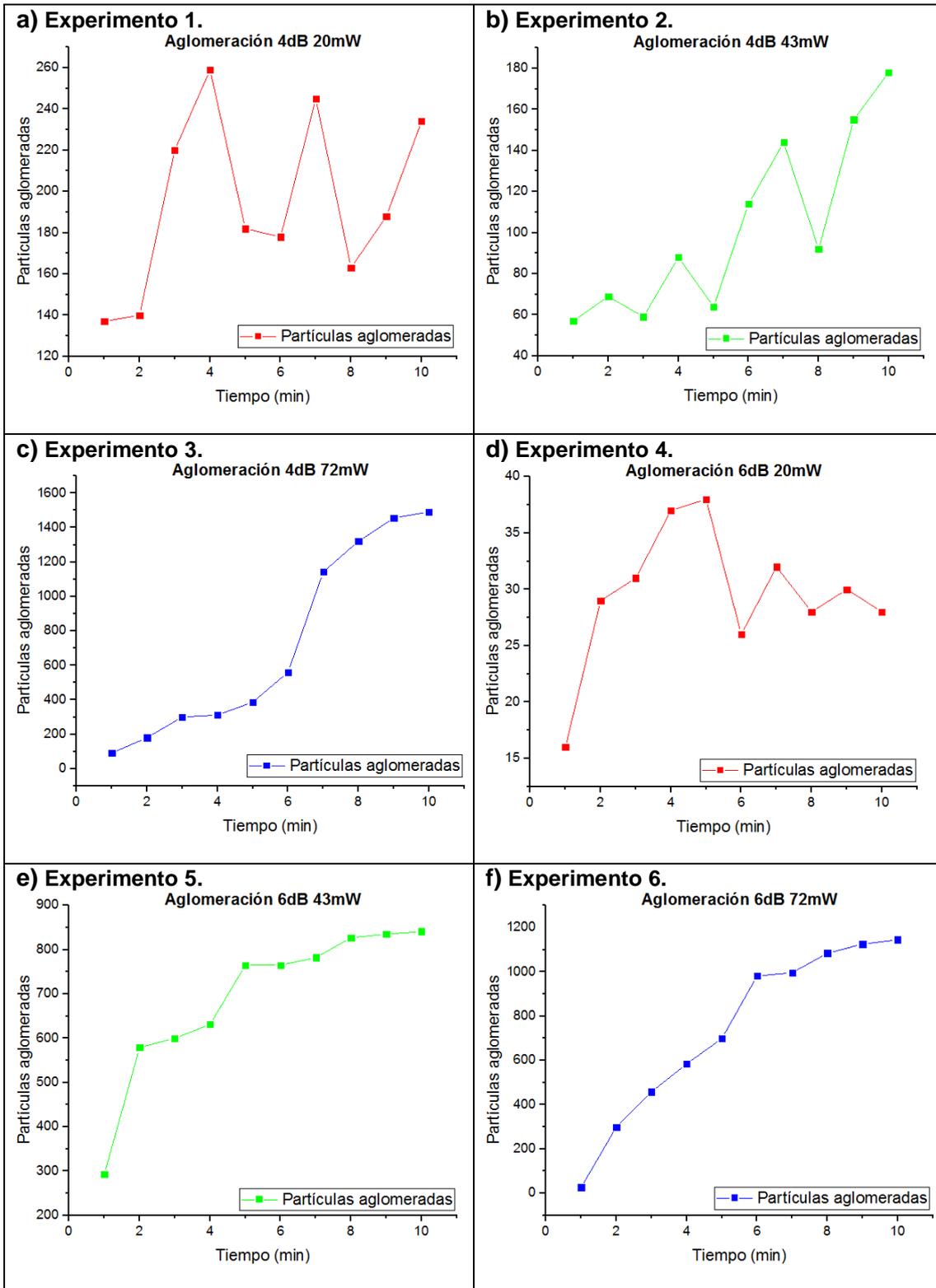


Fig. 45 Gráficos donde se registra la aglomeración de partículas de poliestireno de 1 micra en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser ( $P$ ) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida ( $\alpha_{\text{atn}}$ ) de 4dB, b) donde  $P=43$  mW y  $\alpha_{\text{atn}}=4$ dB, c) con  $P=72$  mW y  $\alpha_{\text{atn}}=4$ dB, d) cuando  $P=20$ mW y  $\alpha_{\text{atn}}=6$ dB, e) donde  $P=43$  mW y  $\alpha_{\text{atn}}=6$  dB y f) con  $P=72$  mW y  $\alpha_{\text{atn}}=6$  dB.

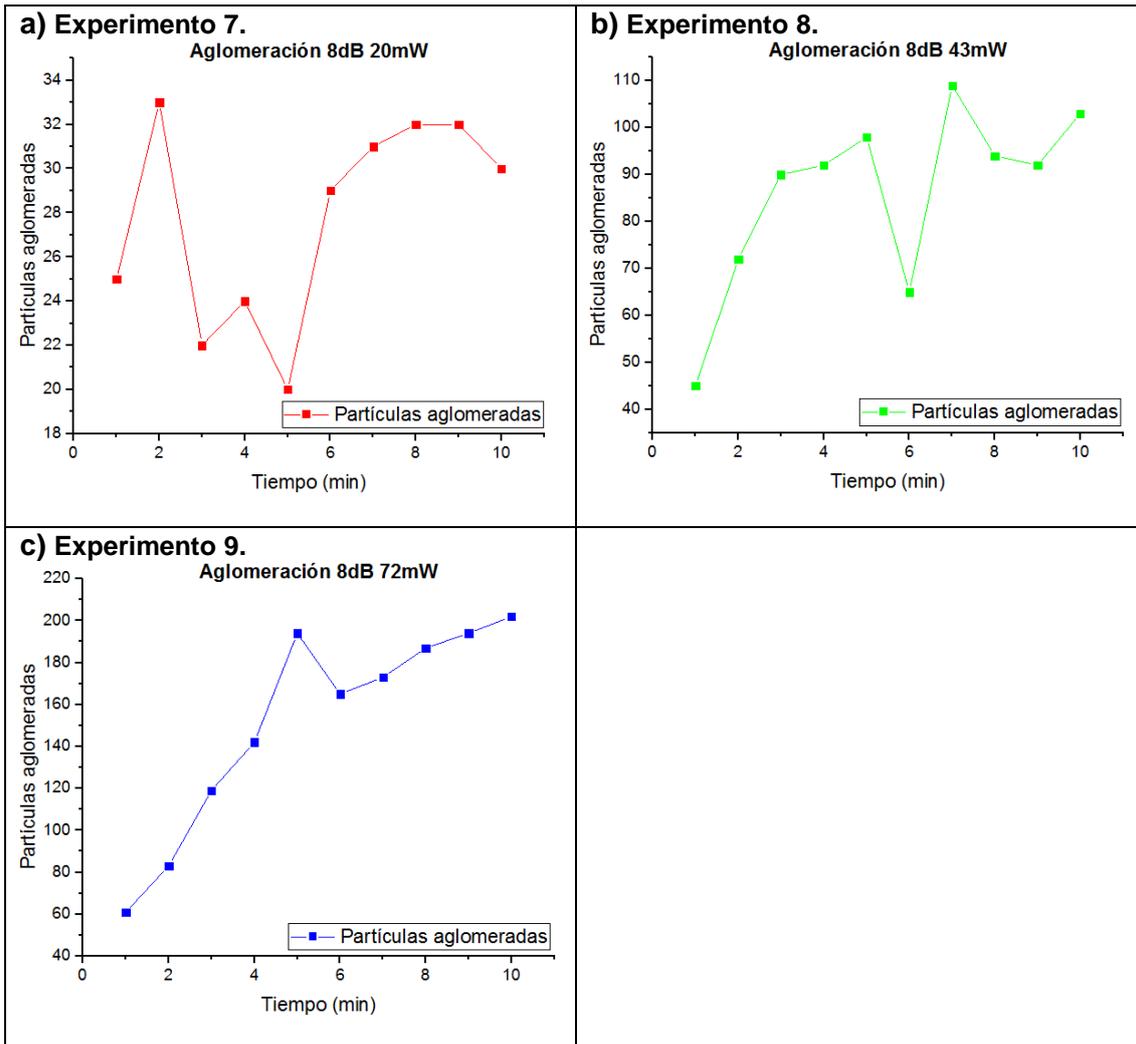


Fig. 46 Gráficos donde se registra la aglomeración de partículas de poliestireno de 1 micra en las cercanías de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 8 dB, b) donde P= 43 mW y atn= 8 dB y c) con P=72 mW y atn= 8 dB.

Las tablas 7 y 8 muestran las cantidades estimadas de partículas aglomeradas en las proximidades de la fibra óptica por minuto.

a) Aglomeración experimento 1.		b) Aglomeración experimento 2.		c) Aglomeración experimento 3.	
Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas
01:00	137	01:00	57	01:00	91
02:00	140	02:00	69	02:00	180
03:00	220	03:00	59	03:00	300
04:00	259	04:00	88	04:00	312
05:00	182	05:00	64	05:00	386
06:00	178	06:00	114	06:00	560
07:00	245	07:00	144	07:00	1143
08:00	163	08:00	92	08:00	1321
09:00	188	09:00	155	09:00	1456
10:00	234	10:00	178	10:00	1491

d) Aglomeración experimento 4.		e) Aglomeración experimento 5.		f) Aglomeración experimento 6.	
Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas
01:00	16	01:00	293	01:00	27
02:00	29	02:00	579	02:00	299
03:00	31	03:00	600	03:00	458
04:00	37	04:00	631	04:00	584
05:00	38	05:00	765	05:00	699
06:00	26	06:00	765	06:00	981
07:00	32	07:00	782	07:00	996
08:00	28	08:00	827	08:00	1084
09:00	30	09:00	835	09:00	1125
10:00	28	10:00	841	10:00	1145

Tabla 7 Aglomeración de partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 4dB, b) donde P= 43 mW y atn= 4dB, c) con P=72 mW y atn= 4dB, d) cuando P= 20mW y atn= 6dB, e) donde P= 43 mW y atn=6 dB, f) y con P=72 mW y atn=6 dB.

a) Aglomeración experimento 7.		b) Aglomeración experimento 8.		c) Aglomeración experimento 9.	
Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas
01:00	25	01:00	45	01:00	61
02:00	33	02:00	72	02:00	83
03:00	22	03:00	90	03:00	119
04:00	24	04:00	92	04:00	142
05:00	20	05:00	98	05:00	194
06:00	29	06:00	65	06:00	165
07:00	31	07:00	109	07:00	173
08:00	32	08:00	94	08:00	187
09:00	32	09:00	92	09:00	194
10:00	30	10:00	103	10:00	202

Tabla 8 Aglomeración de partículas de poliestireno de 1 micra considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 8 dB, b) donde P= 43 mW y atn= 8 dB y c) con P=72 mW y atn= 8 dB.

Las siguientes imágenes corresponden a la aglomeración progresiva de partículas en la vecindad de la fibra óptica en distintos instantes de tiempo.

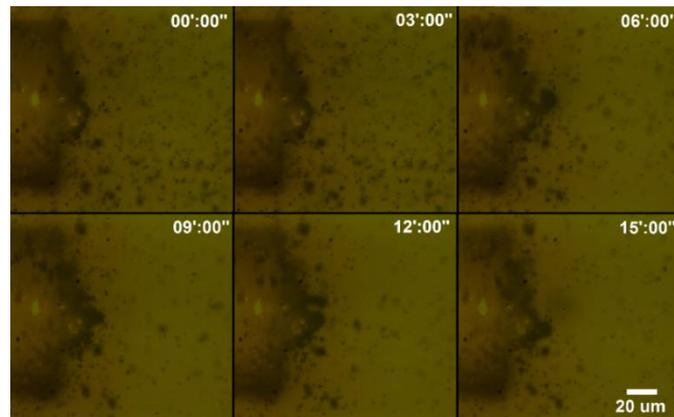


Fig. 47 Aglomeración ocurrida durante el experimento 1, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB.

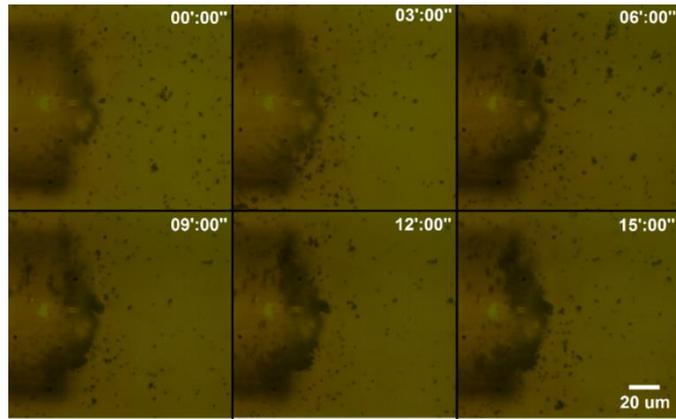


Fig. 48 Aglomeración ocurrida durante el experimento 2, donde el láser operó con una potencia de 43 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB.

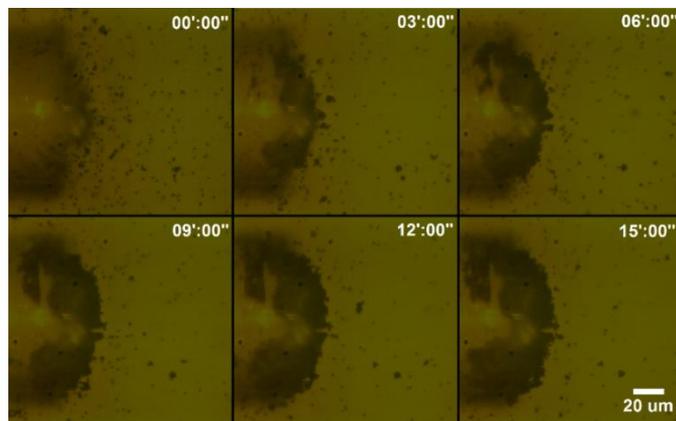


Fig. 49 Aglomeración ocurrida durante el experimento 3, donde el láser operó con una potencia de 72 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB.

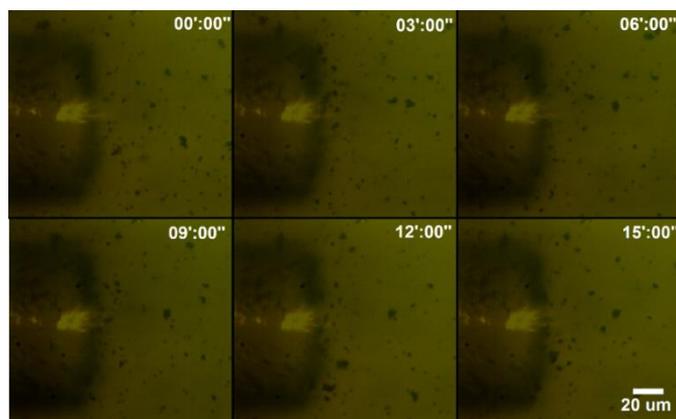


Fig. 50 Aglomeración ocurrida durante el experimento 4, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 6 dB.

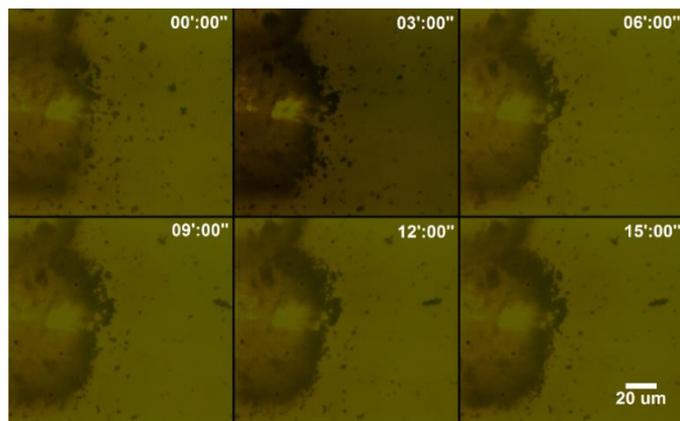


Fig. 51 Aglomeración ocurrida durante el experimento 5, donde el láser operó con una potencia de 43 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 6 dB.

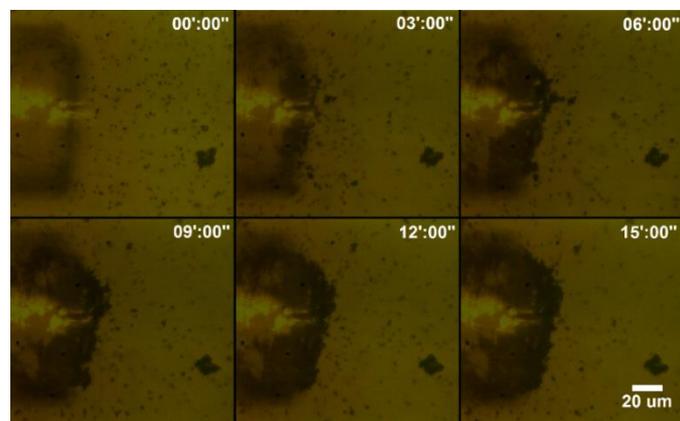


Fig. 52 Aglomeración ocurrida durante el experimento 6, donde el láser operó con una potencia de 72 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 6 dB.

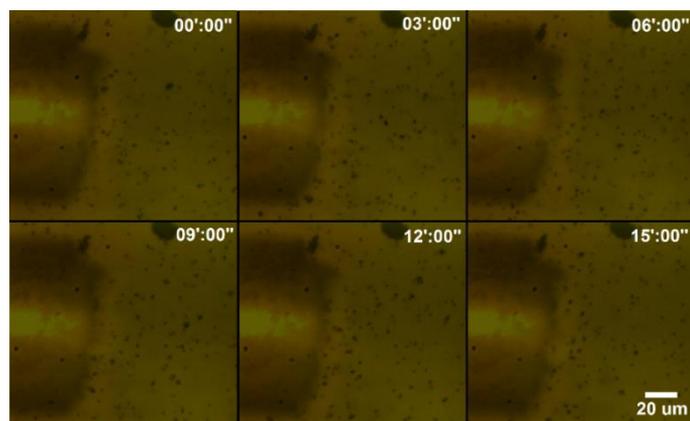


Fig. 53 Aglomeración ocurrida durante el experimento 7, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 8 dB.

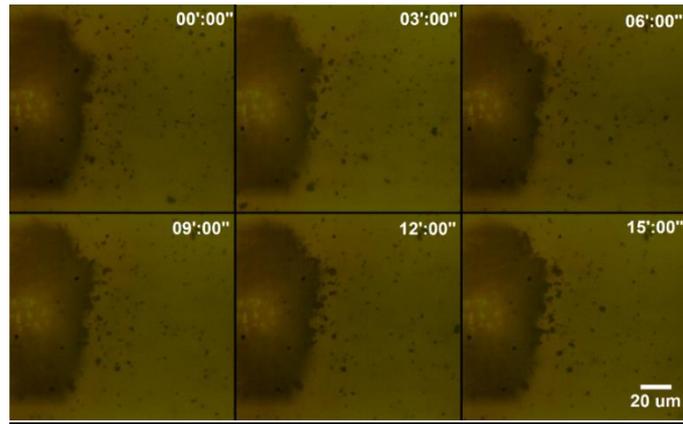


Fig. 54 Aglomeración ocurrida durante el experimento 8, donde el láser operó con una potencia de 43 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 8 dB.

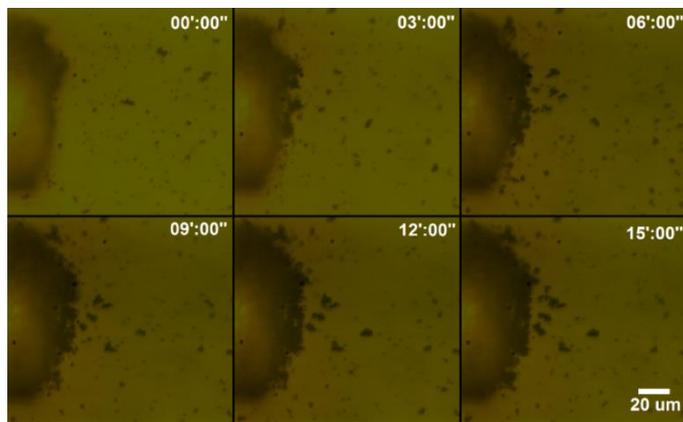


Fig. 55 Aglomeración ocurrida durante el experimento 9, donde el láser operó con una potencia de 72 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 8 dB.



#### 4.4.3.1. Resultados obtenidos para las partículas de PS de 3 micras (experimentos del 10 al 16).

Se utilizaron potencias del láser de 20, 105 y 200 mW para fotodeposiciones de nanopartículas de plata que provocaron pérdidas de potencia de 2, 3 y 4 dB. Los resultados cuantitativos se muestran a continuación en las figuras 56 y 57, donde se grafica el número de aglomerados por unidad de tiempo para cada experimento.

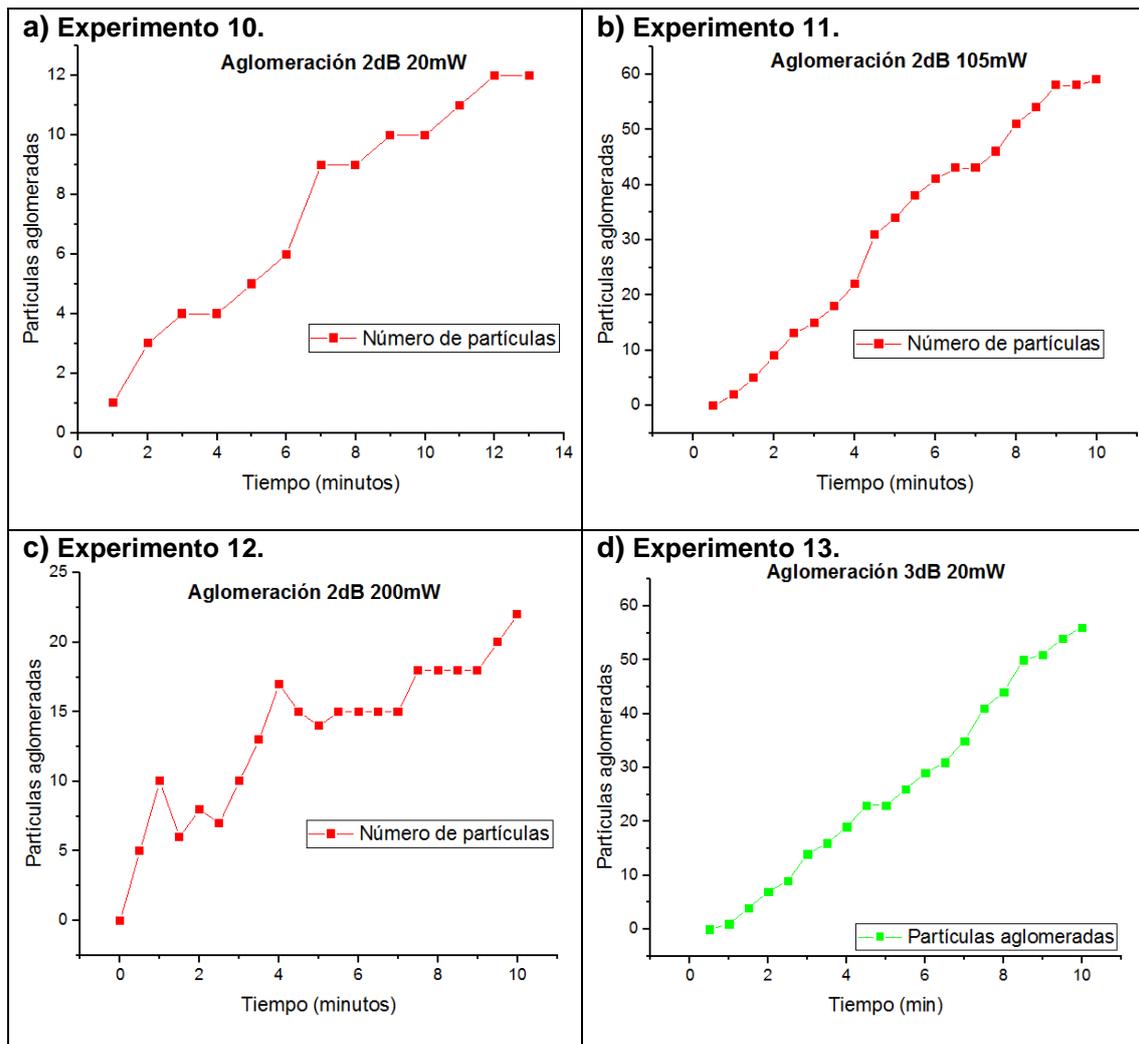


Fig. 56 Gráficos donde se registra la aglomeración de partículas de poliestireno de 3 micras en las cercanías de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 2 dB, b) donde P= 105 mW y atn= 2 dB, c) cuando P= 200 mW y atn= 2 dB y d) con P=20 mW y atn= 3 dB.

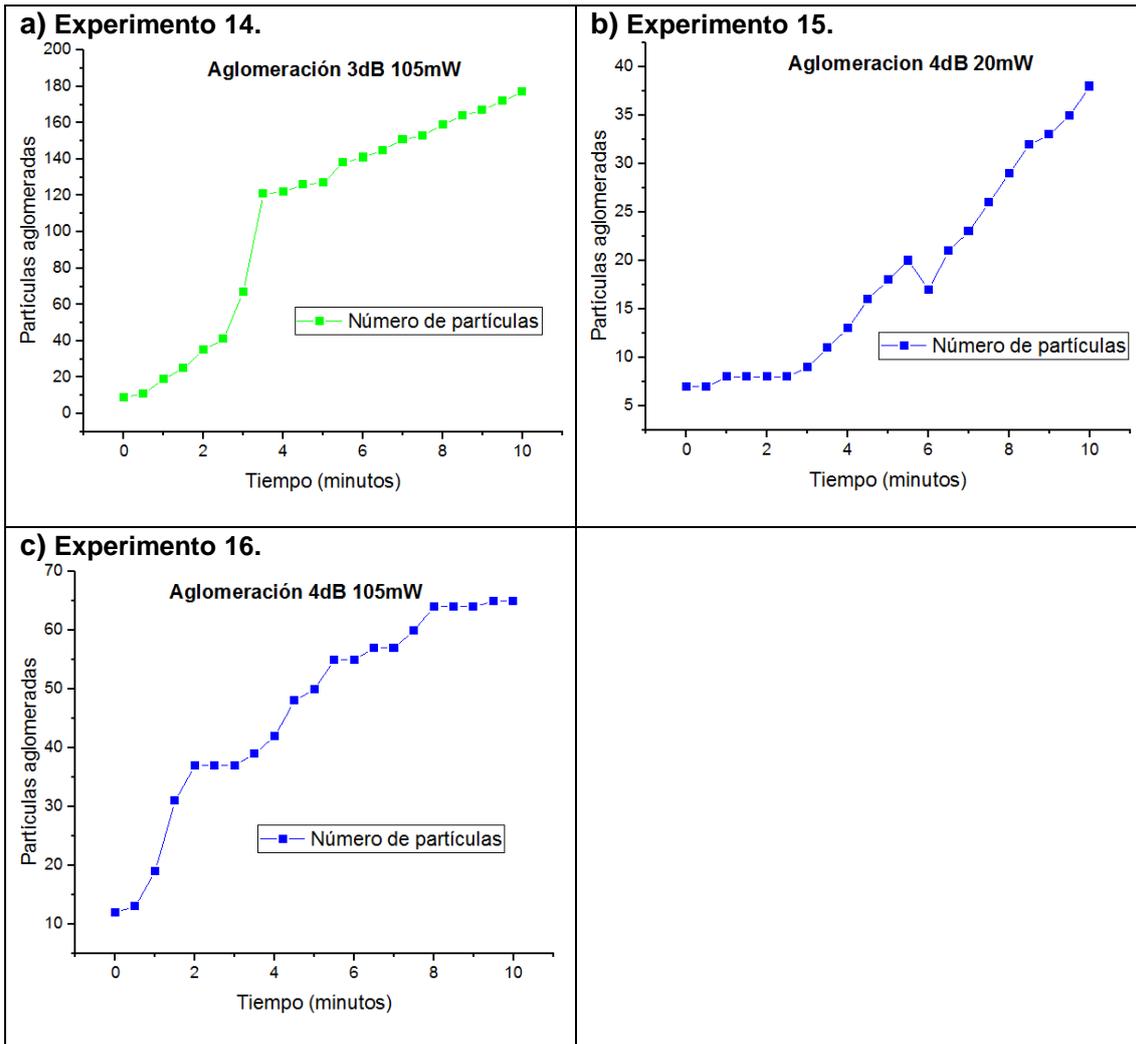


Fig. 57 Gráficos donde se registra la aglomeración de partículas de poliestireno de 3 micras en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 105 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 3 dB, b) donde P= 20 mW y atn= 4 dB y c) cuando P= 105 mW y atn= 4 dB.

Las tablas 9 y 10 muestran las cantidades estimadas de partículas aglomeradas en las proximidades de la fibra óptica por minuto.

a)				b)			
Aglomeración experimento 10.				Aglomeración experimento 11.			
Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas
01:00	9	08:00	17	00:30	0	05:30	38
02:00	11	09:00	18	01:00	2	06:00	41
03:00	12	10:00	18	01:30	5	06:30	43
04:00	12	11:00	19	02:00	9	07:00	43
05:00	13	12:00	20	02:30	13	07:30	46
06:00	14	13:00	20	03:00	15	08:00	51
07:00	17			03:30	18	08:30	54
				04:00	22	09:00	58
				04:30	31	09:30	58
				05:00	34	10:00	59
c)				d)			
Aglomeración experimento 12.				Aglomeración experimento 13.			
Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas
00:30	5	05:30	15	00:30	0	05:30	26
01:00	10	06:00	15	01:00	1	06:00	29
01:30	6	06:30	15	01:30	4	06:30	31
02:00	8	07:00	15	02:00	7	07:00	35
02:30	7	07:30	18	02:30	9	07:30	41
03:00	10	08:00	18	03:00	14	08:00	44
03:30	13	08:30	18	03:30	16	08:30	50
04:00	17	09:00	18	04:00	19	09:00	51
04:30	15	09:30	20	04:30	23	09:30	54
05:00	14	10:00	22	05:00	23	10:00	56

Tabla 9 Aglomeración de partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 20 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 2 dB, b) donde P= 105 mW y atn= 2 dB, c) con P= 200 mW y atn= 2 dB y d) cuando P= 20mW y atn= 3 dB.

<b>a)</b>				<b>b)</b>			
<b>Aglomeración experimento 14.</b>				<b>Aglomeración experimento 15.</b>			
<b>Tiempo (min)</b>	<b>No. De partículas</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>No. De partículas</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>No. De partículas</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>No. De partículas</b>
00:30	11	05:30	138	00:30	7	05:30	20
01:00	19	06:00	141	01:00	8	06:00	17
01:30	25	06:30	145	01:30	8	06:30	21
02:00	35	07:00	151	02:00	8	07:00	23
02:30	41	07:30	153	02:30	8	07:30	26
03:00	67	08:00	159	03:00	9	08:00	29
03:30	121	08:30	164	03:30	11	08:30	32
04:00	122	09:00	167	04:00	13	09:00	33
04:30	126	09:30	172	04:30	16	09:30	35
05:00	127	10:00	177	05:00	18	10:00	38

<b>c)</b>			
<b>Aglomeración experimento 16.</b>			
<b>Tiempo (min)</b>	<b>No. De partículas</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>No. De partículas</b>
00:30	13	05:30	55
01:00	19	06:00	55
01:30	31	06:30	57
02:00	37	07:00	57
02:30	37	07:30	60
03:00	37	08:00	64
03:30	39	08:30	64
04:00	42	09:00	64
04:30	48	09:30	65
05:00	50	10:00	65

Tabla 10 Aglomeración de partículas de poliestireno de 3 micras considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 105 mW, empleando una fibra cuyas nanopartículas contenidas provocaron una pérdida (atn) de 3 dB, b) donde P= 20 mW y atn= 4 dB y c) con P= 105 mW y atn= 4 dB.

Las siguientes imágenes corresponden a la aglomeración progresiva de partículas en la vecindad de la fibra óptica en distintos instantes de tiempo.

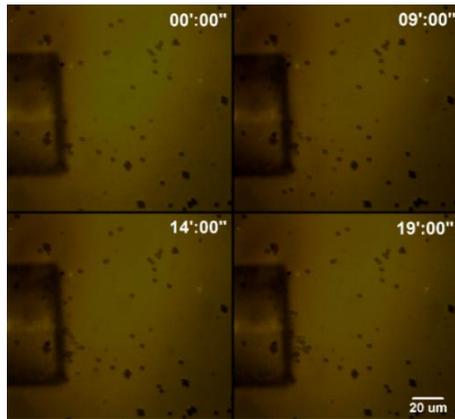


Fig. 58 Aglomeración ocurrida durante el experimento 10, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 2 dB.

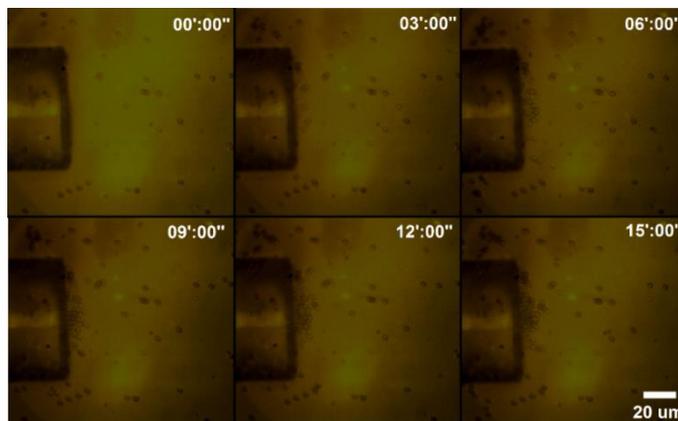


Fig. 59 Aglomeración ocurrida durante el experimento 11, donde el láser operó con una potencia de 105 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 2 dB.

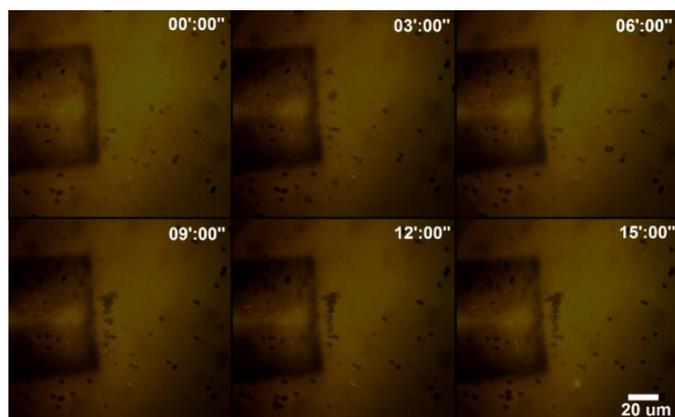


Fig. 60 Aglomeración ocurrida durante el experimento 12, donde el láser operó con una potencia de 200 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 2 dB.

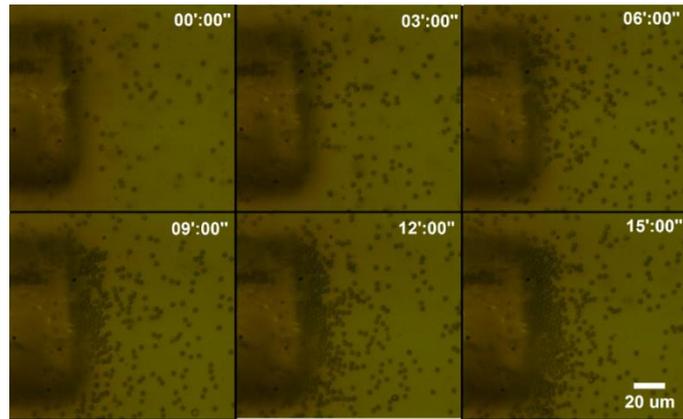


Fig. 61 Aglomeración ocurrida durante el experimento 13, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 3 dB.

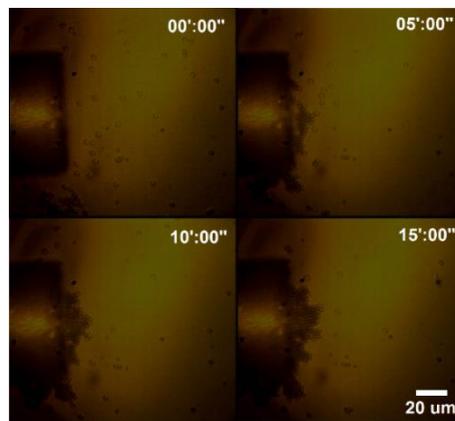


Fig. 62 Aglomeración ocurrida durante el experimento 14, donde el láser operó con una potencia de 105 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 3 dB.

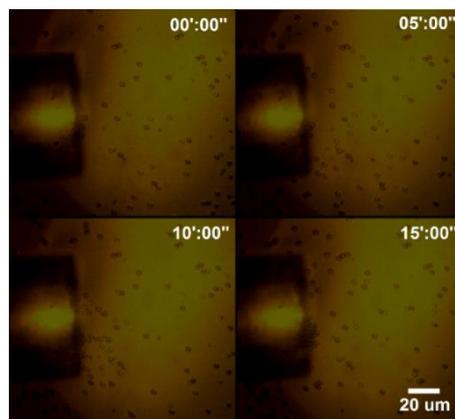


Fig. 63 Aglomeración ocurrida durante el experimento 15, donde el láser operó con una potencia de 20 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB.

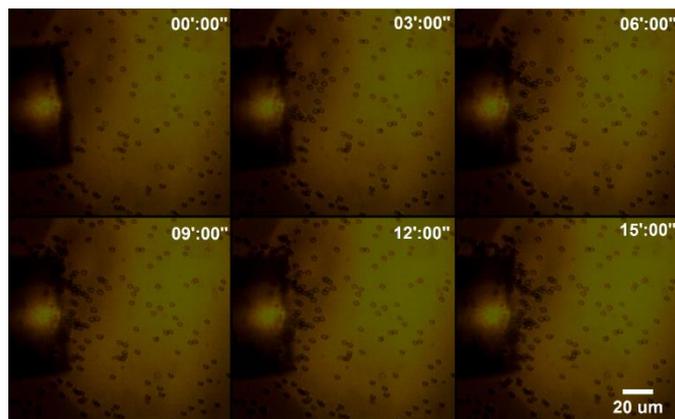


Fig. 64 Aglomeración ocurrida durante el experimento 16, donde el láser operó con una potencia de 105 mW, habiéndose hecho una fotodeposición que provocó una pérdida de potencia de 4 dB.

#### 4.1.4. Interpretación general de los resultados.

En todos los casos donde se utiliza una fibra con la misma cantidad de partículas fotodepositadas (en los experimentos donde la atenuación que sufre la fibra óptica luego de la fotodeposición es la misma) se observa que las velocidades de las partículas dieléctricas aumentan cuando la potencia del láser es mayor. Esto es lógico, pues mientras mayor sea la energía electromagnética suministrada, mayor es el gradiente de temperatura que se genera, incrementando así la velocidad de las partículas. Para hacer esta aseveración más evidente, se presenta un ejemplo a continuación.

Velocidades promedio adquiridas por las partículas de 1 micra cuando las nanopartículas de plata fotodepositadas en la fibra provocaron una atenuación de 4 dB, mientras la potencia del láser fue de:		
20 mW	43 mW	72 mW
136.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	181.02 $\mu\text{m}/\text{min}$	342.85 $\mu\text{m}/\text{min}$

Tabla 11 Ejemplo de cómo aumenta la velocidad de las partículas de acuerdo a la potencia con que opera el láser mientras la luz que sale de la punta de la fibra óptica experimenta una atenuación de 4 dB debida a la fotodeposición.

Por otro lado, los experimentos donde la potencia de operación del láser fue la misma, pero la atenuación de la fibra provocada por las nanopartículas fotodepositadas es diferente, arrojan que la velocidad adquirida por las partículas puede llegar a disminuir mientras mayor es la cantidad de partículas fotodepositadas (lo que provoca una mayor atenuación). Esto puede deberse a que una fracción del calor generado en la punta de la fibra óptica no se disipa hacia el medio porque la "película" de nanopartículas fotodepositadas es demasiado gruesa. Para asimilar esto de forma numérica, se presenta un ejemplo a continuación.

Velocidades promedio adquiridas por las partículas de 1 micra cuando la potencia del láser fue de 20 mW, mientras la atenuación provocada por las nanopartículas de plata fotodepositadas en la fibra fue de:		
4 dB	6 dB	8 dB
136.28 $\mu\text{m}/\text{min}$	105.85 $\mu\text{m}/\text{min}$	75.89 $\mu\text{m}/\text{min}$

Tabla 12 Ejemplo de cómo disminuye la velocidad de las partículas de acuerdo a la atenuación provocada por la fotodeposición, mientras el láser opera con una potencia de 20 mW.

Como es de esperarse, el mismo comportamiento se presenta en el caso de la velocidad instantánea. Respecto a este estudio, cabe mencionar que las partículas eran más veloces cuando se encontraban a 50 micras de la fibra óptica (en promedio).

En cuanto a los resultados numéricos relacionados con la aglomeración de partículas, puede decirse que estos no solo dependían de la potencia y atenuación de la luz, sino también de la concentración de la mezcla y de la flotabilidad o fricción de las partículas dieléctricas. Por tanto, no viene al caso realizar una comparación que dependa de la atenuación y/o de la potencia de la luz.

## 4.2. Resultados de la migración de micropartículas metálicas.

Los experimentos con las micropartículas de plata, cuyos tamaños variaron de 0.5 a 1 micra, mostraron resultados ambiguos. Dado que estas absorben la longitud de onda de la radiación láser, era natural deducir la ocurrencia de la fotoforesis indirecta positiva porque el hemisferio irradiado se calienta al transformar la energía electromagnética en térmica dando paso a la migración de la partícula hacia la región fría del medio circundante. Lo que en realidad se observó no solo fue este comportamiento, sino que también se manifestó un movimiento opuesto, es decir, ciertas partículas se desplazaron hacia la cara de la fibra óptica. Puesto que las observaciones experimentales mostraron movimientos tan atípicos es necesario un estudio más profundo de ellos para dilucidar qué fenómenos se exhiben en cada caso, cosa que no se realiza en esta tesis dada la envergadura del problema físico a resolver.

A pesar de no ofrecer una explicación certera de los mecanismos responsables de la moción en las partículas de plata, en este trabajo se ofrecen tres hipótesis basadas en las observaciones durante la experimentación, dos para explicar el movimiento atractivo hacia la fibra y uno para explicar el desplazamiento contrario. Además, se expone un análisis cuantitativo muy similar al brindado en las secciones anteriores donde se estudia el movimiento de las partículas dieléctricas.

### Hipótesis 1 para explicar el movimiento atractivo de las micropartículas de plata: Fotoforesis de tipo $\Delta\alpha$ .

Se encontró que el fenómeno causante del movimiento atractivo de las partículas de plata, fue la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  (véase sección 2.7.2.4). Esta ocurre cuando una fracción del calor generado por la conversión luz-calor se difunde de manera no uniforme dentro de la partícula dando lugar al evento definido como fotoforesis. El resto del calor que sale de la partícula y se difunde, también de manera no uniforme hacia el medio



circundante, provoca un aumento de la energía cinética en sus moléculas. Por lo tanto, se produce un gradiente de temperatura en la vecindad de la partícula de modo que las moléculas ubicadas en el hemisferio expuesto a la luz adquieren más energía que las ubicadas en el sombreado. Esto se denomina termoforesis.

Tanto la termoforesis como la fotoforesis están presentes en la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  (lo que se visualiza gráficamente en la Fig. 65) y ambos fenómenos pueden vincularse mediante el coeficiente de acomodación térmica,  $\alpha$ . Este coeficiente es resultado de la diferencia de intercambio de momento entre las moléculas del medio circundante y las moléculas que forman parte de la partícula.



Fig. 65 Fuerzas que actúan sobre las partículas metálicas por efecto de la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$ , donde  $\vec{E}$  es la dirección de propagación del haz luminoso y  $\vec{F}_{\Delta\alpha}$  es la fuerza fotoforética  $\Delta\alpha$ . Las flechas verdes y rosas indican el intercambio de momento entre el medio huésped y la partícula.

Hipótesis 2 para explicar el movimiento atractivo de las micropartículas de plata: Termoforesis negativa.

El movimiento atractivo de las partículas también puede deberse a la termoforesis pues cada partícula transfiere energía calorífica al medio circundante. Es posible que ocurra una suma del calor generado por cada partícula, de tal suerte que el líquido que se encuentra cerca de la fibra óptica presenta un gradiente de temperatura que provoca la migración de las partículas cercanas a la fibra óptica, evento que da lugar a la termoforesis negativa, como se visualiza en la Fig. 66.

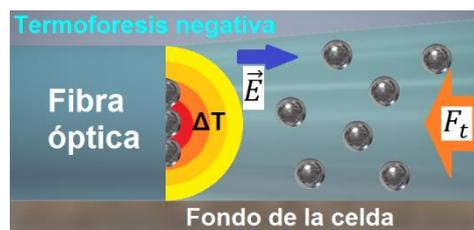


Fig. 66 Esquema representativo de las fuerzas que actúan sobre las partículas metálicas por efecto de la termoforesis negativa, donde  $\vec{E}$  es la dirección de propagación del haz luminoso,  $\vec{F}_t$  es la fuerza termoforética y  $\Delta T$  es el gradiente de temperatura generado por las micropartículas de plata cercanas a la cara de la fibra óptica.

Hipótesis para explicar el movimiento de las micropartículas de plata en la misma dirección con que se propaga el haz: fotoforesis indirecta negativa.

Como ya se dijo en el primer párrafo de esta sección, el fenómeno de fotoforesis indirecta positiva era el que se esperaba por razones lógicas. Cuando un hemisferio de una partícula absorbente es impactado con el tipo de energía electromagnética que

precisamente es capaz de absorber, ocurre una conversión luz-calor que da paso a un desplazamiento de dicha partícula hasta que esta logre alcanzar el equilibrio térmico o el equilibrio de fuerzas necesario para detenerse (véase la Fig. 67).

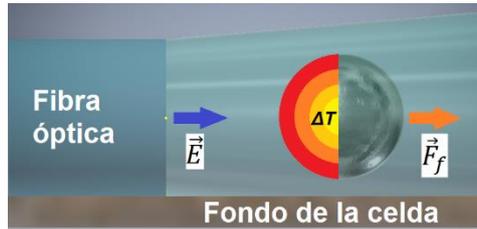


Fig. 67 Fuerzas que actúan sobre las partículas metálicas por efecto de la fotoforesis positiva, donde  $\vec{E}$  es la dirección de propagación del haz luminoso,  $\vec{F}_f$  es la fuerza fotoforética y  $\Delta T$  es el gradiente de temperatura en la superficie de la partícula.

A continuación, se exponen los resultados cuantitativos que surgieron al analizar los experimentos.

#### 4.2.1. Distancias recorridas por las partículas por unidad de tiempo.

La metodología para realizar este análisis es técnicamente la misma que la descrita en la sección 4.1.1. (véase dicha sección). Se utilizaron potencias del láser de 110 y 204 mW, hecho que se expone en la tabla 2. En este caso no se requirió hacer fotodeposición debido a la naturaleza absorbente de las partículas. Los resultados cuantitativos se muestran a continuación.

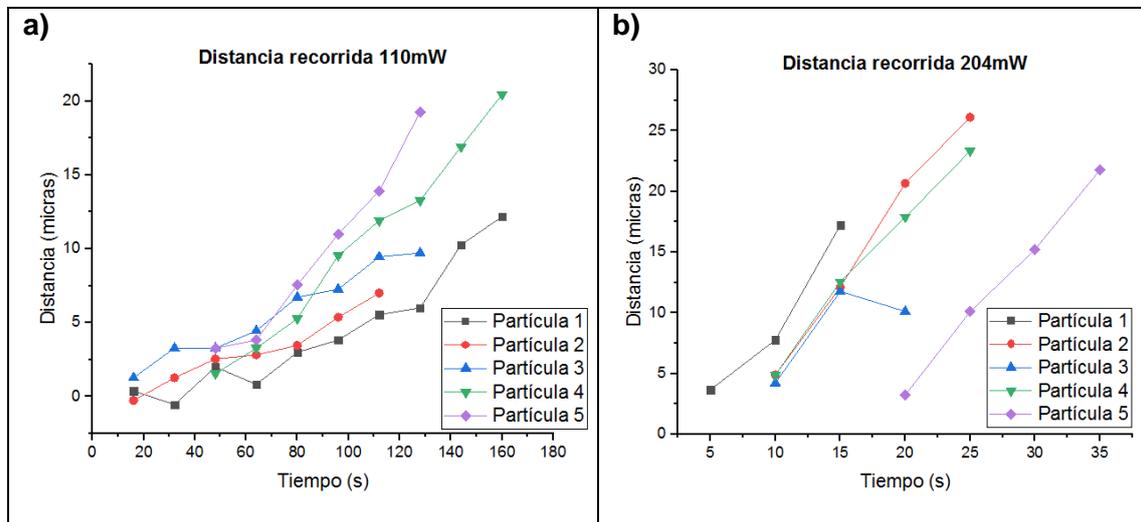


Fig. 68 Gráficos donde se describen las distancias recorridas por las partículas de plata de 1 micra en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 110 mW y b) donde P= 204 mW.

Al igual que en el caso de las partículas dieléctricas, se presentan a continuación las tablas que dan información sobre las velocidades y las distancias recorridas por las

partículas de plata. De la misma forma, la distancia recorrida por las partículas es la distancia a la que se encontraban respecto de la fibra óptica antes de desplazarse.

a)			b)		
Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 17.			Velocidades y distancias recorridas por las partículas en el experimento 18.		
	Velocidad	Distancia		Velocidad	Distancia
Partícula 1	4.56 $\mu\text{m}/\text{min}$	12.18 $\mu\text{m}$	Partícula 1	68.88 $\mu\text{m}/\text{min}$	17.22 $\mu\text{m}$
Partícula 2	3.75 $\mu\text{m}/\text{min}$	7 $\mu\text{m}$	Partícula 2	78.33 $\mu\text{m}/\text{min}$	26.11 $\mu\text{m}$
Partícula 3	4.55 $\mu\text{m}/\text{min}$	9.72 $\mu\text{m}$	Partícula 3	40.44 $\mu\text{m}/\text{min}$	10.11 $\mu\text{m}$
Partícula 4	9.58 $\mu\text{m}/\text{min}$	20.45 $\mu\text{m}$	Partícula 4	70 $\mu\text{m}/\text{min}$	23.33 $\mu\text{m}$
Partícula 5	12.04 $\mu\text{m}/\text{min}$	19.27 $\mu\text{m}$	Partícula 5	65.33 $\mu\text{m}/\text{min}$	21.77 $\mu\text{m}$

Tabla 13 Velocidades promedio adquiridas y distancias recorridas por las partículas de plata de 1 micra en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 110 mW y b) donde P= 204 mW.

#### 4.2.2. Aglomerados por unidad de tiempo.

La metodología para realizar este análisis es técnicamente la misma que la descrita en la sección 4.1.3. (Véase dicha sección). En estos experimentos se utilizaron potencias del láser de 110 y 204 mW. En este caso no se requirió hacer fotodeposición debido a la naturaleza absorbente de las partículas. Los resultados cuantitativos se muestran a continuación.

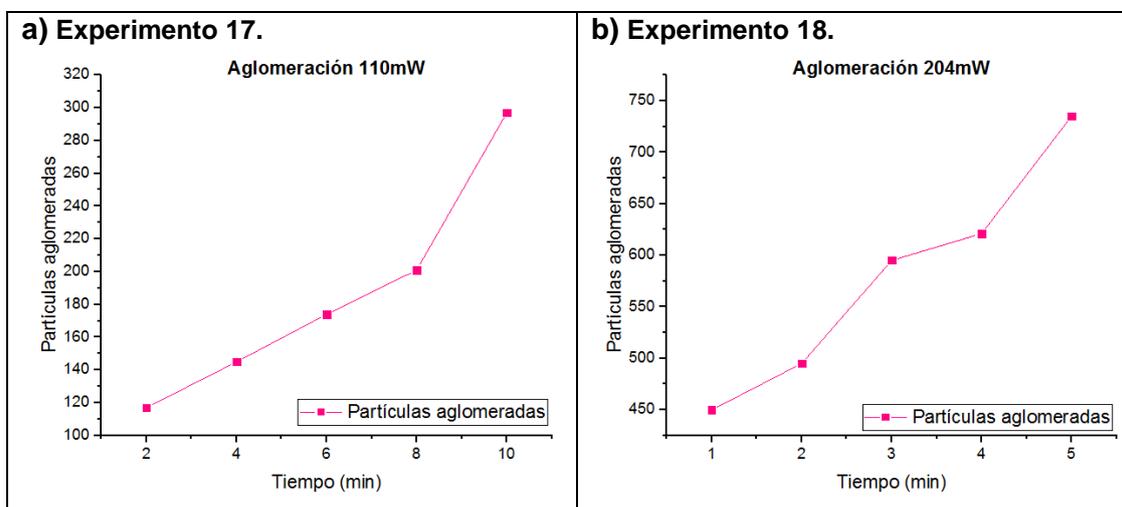


Fig. 69 Gráficos donde se registra el número de partículas de plata de 1 micra que se aglomeraron en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 110 mW y b) donde P= 204 mW.

a) Aglomeración experimento 17.		b) Aglomeración experimento 18.	
Tiempo (min)	No. De partículas	Tiempo (min)	No. De partículas
02:00	117	01:00	450
04:00	145	02:00	495
06:00	174	03:00	595
08:00	201	04:00	621
10:00	297	05:00	735

Tabla 14 Gráficos donde se registra el número de partículas de plata de 1 micra que se aglomeraron en las vecindades de la fibra óptica considerando a) una potencia de la luz láser (P) de 110 mW y b) donde P= 204 mW.

En seguida se presentan las imágenes que ilustran la aglomeración progresiva de las micropartículas de plata alrededor de la fibra óptica, en diferentes instantes de tiempo.

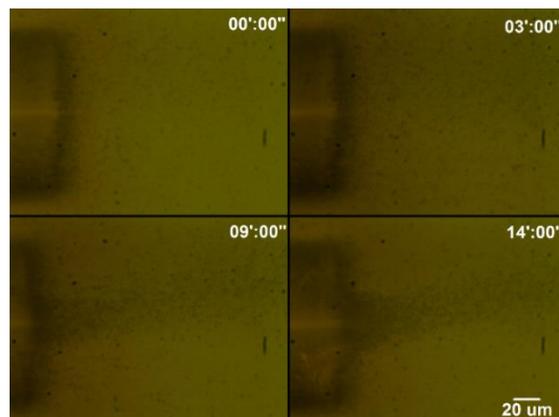


Fig. 70 Aglomeración ocurrida durante el experimento 17, donde el láser operó con una potencia de 110 mW

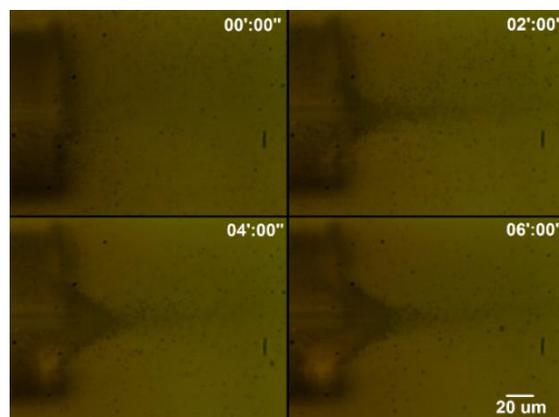


Fig. 71 Aglomeración ocurrida durante el experimento 18, donde el láser operó con una potencia de 204 mW.

Además de que se demostró que las micropartículas de plata pueden aglomerarse en los alrededores de la fibra óptica también se observó que, si se aleja la fibra de la zona de aglomeración, las partículas se desplazan de nuevo hasta ella y vuelven a agruparse. Esto puede ser utilizado como una forma de migrar grandes cantidades de partículas de forma masiva. En la Fig. 72 y en la Fig. 73 se muestra este comportamiento para potencias de operación del láser de 110 y 204 mW. Nótese que las partículas se aglomeran con mayor rapidez cuando la potencia de operación del láser es de 204 mW. Esto quiere decir que tanto la velocidad de las partículas como la magnitud de aglomeración aumentan si también hay un incremento en la potencia del láser.

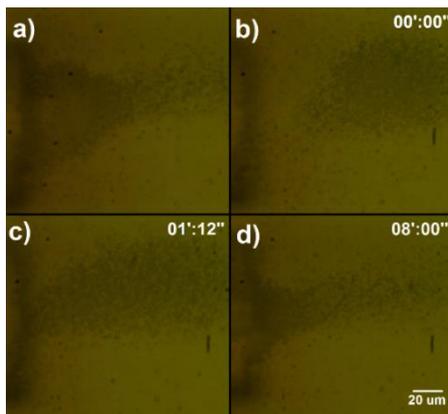


Fig. 72 Migración masiva ocurrida al alejar la fibra óptica de la zona de aglomeración cuando la potencia de operación del láser fue de 110 mW (experimento 17). En esta figura puede apreciarse a) la aglomeración original de micropartículas de plata, b) el instante en que la fibra fue desplazada, c) el desplazamiento de las partículas y d) la reagrupación en las vecindades de la fibra.

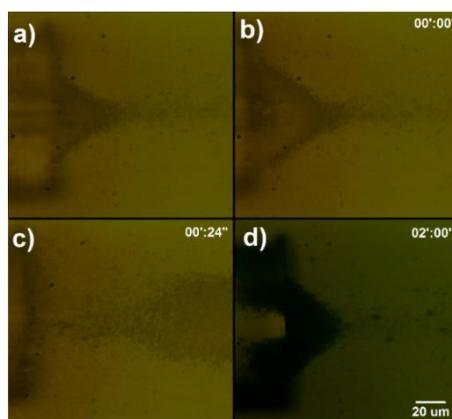


Fig. 73 Migración masiva ocurrida al alejar la fibra óptica de la zona de aglomeración cuando la potencia de operación del láser fue de 204 mW (experimento 18). En esta figura puede apreciarse a) la aglomeración original de micropartículas de plata, b) el instante en que la fibra fue desplazada, c) el desplazamiento de las partículas y d) la reagrupación en las vecindades de la fibra.

### 4.2.3. Otros fenómenos físicos relacionados a los experimentos con micropartículas de plata.

Por azares de la naturaleza absorbente de las micropartículas de plata, la conversión energética luz-calor es tan fuerte que no solo ocurre la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$ , fenómeno que da como resultado un movimiento atractivo de las micropartículas hacia la fibra óptica.

Durante los experimentos se observó que, cuando las partículas se encuentran a cierta distancia de la fibra óptica, estas se mueven en la misma dirección de propagación del haz, es decir, se alejaron de la fibra óptica en vez de acercarse a ella. Como consecuencia a este movimiento ocurrió una aglomeración a una distancia considerable de la fibra óptica.

A pesar de que no se realizó un análisis cuantitativo de este movimiento, fue evidente que la magnitud de micropartículas aglomeradas en la lejanía de la fibra óptica es mayor en tanto mayor sea la potencia del láser. Lo mismo ocurre con la velocidad, es mayor en tanto mayor sea la potencia. En las figuras siguientes (Fig. 74 y Fig. 75) se muestra el desplazamiento de las micropartículas de plata en la dirección de propagación del haz y la aglomeración de estas al emplear potencias del láser de 110 y 204 mW.

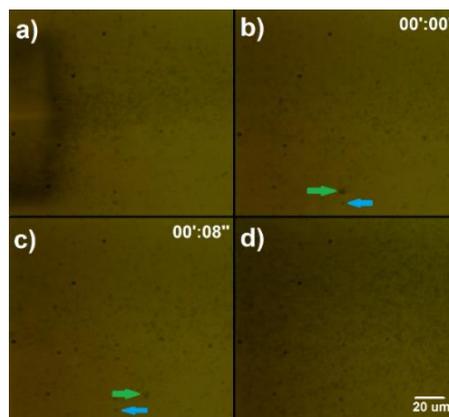


Fig. 74 Desplazamiento atípico de las micropartículas de plata en la misma dirección de propagación del haz utilizando una potencia de operación del láser de 110 mW (experimento 17). Aquí se observan a) las partículas que se encuentran en la vecindad de la fibra óptica, b) grupos de partículas moviéndose en la misma dirección de propagación del haz donde la mancha señalada con la flecha azul es un punto de referencia y la mancha señalada con flecha verde es un microobjeto, c) un desplazamiento del microobjeto respecto del punto de referencia y d) partículas aglomeradas en las lejanías de la fibra óptica.

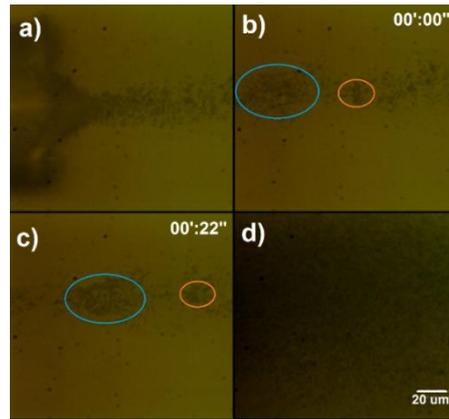


Fig. 75 Desplazamiento atípico de las micropartículas de plata en la misma dirección de propagación del haz utilizando una potencia de operación del láser de 204 mW (experimento 18). Aquí se observan a) las partículas que se encuentran en la vecindad de la fibra óptica, b) grupos de partículas moviéndose en la misma dirección de propagación del haz donde se señalan las posiciones originales de dos grupos de partículas, los cuales están encerrados en óvalos, c) un desplazamiento de ambos grupos de partículas y d) partículas aglomeradas en las lejanías de la fibra óptica.

## Conclusiones.

La manipulación masiva de micro y nanopartículas es una tarea que puede realizarse mediante diferentes principios y fenómenos físicos. Uno de ellos es el aprovechamiento de ondas electromagnéticas y su interacción con la materia con el objetivo de causar una moción controlada. Cuando la energía electromagnética entra en contacto con la materia pueden darse diversas respuestas dependiendo de las propiedades de las ondas irradiadas y de las moléculas del material. Una de estas respuestas es la presión de radiación, la cual se manifiesta como una infinitesimal fuerza que es capaz de mover micro y nano objetos. A pesar de que esta es una opción viable para el atrapamiento de partículas tiene limitaciones debidas a que su magnitud es diminuta. Usualmente se requiere un haz altamente enfocado para concentrar la energía de la luz y magnificar la fuerza de presión de radiación, pero aun así, esta técnica conocida como pinzas ópticas se limita a la manipulación de partículas individuales y de tamaños mesoscópicos.

Cuando las fuerzas ópticas no son suficientes para causar una moción en las partículas de estudio, es posible utilizar otro fenómeno físico que es originado por la naturaleza cuántica de los átomos y moléculas: la absorción. Este caso ocurre cuando un tipo específico de energía electromagnética modifica el estado básico de los átomos, de forma que se genera otra clase de energía, por ejemplo, la térmica. Dado que el calor es producto de un aumento en la frecuencia de oscilación de los átomos, puede suceder que la energía cinética de aquellos que forman una partícula sea lo suficientemente grande como para provocar el movimiento de la partícula entera. Si este aumento de calor está influenciado por algún tipo de radiación electromagnética y causa la moción de la partícula en cuestión, a este evento se le conoce como fotoforesis. Puede mostrarse el caso en que la transformación luz-calor no ocurra en la partícula, sino en las moléculas del medio, circunstancia que también es capaz de provocar el movimiento de dicha partícula por acción del aumento en la frecuencia de oscilación de las moléculas que la rodean. Esta situación se conoce como termoforesis.

Tanto la termoforesis como la fotoforesis son acontecimientos de índole térmica cuyas magnitudes son mucho mayores que las fuerzas ópticas, característica que permite ampliar el rango de tamaños y tipos de partículas que podrían manipularse con su ayuda. Otra ventaja de utilizar estos fenómenos radica en el hecho de que la energía térmica puede distribuirse por un área más grande, lo que termina por afectar a un mayor número de partículas, creando así las condiciones necesarias para la ocurrencia de migraciones masivas.

En este trabajo de tesis se demostró de forma experimental que se puede lograr la migración masiva de micropartículas dieléctricas y metálicas al aprovechar fenómenos de tipo fototérmico. Los fenómenos empleados fueron la termoforesis inducida por



radiación láser para mover micropartículas de poliestireno de látex y la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$  para mover micropartículas de plata. En ambos casos se utilizó una fibra óptica para dirigir la luz hacia la solución de partículas estudiadas.

La inducción de movimiento sobre las partículas dieléctricas implicó la aplicación de una técnica conocida como fotodeposición, la cual consiste en adherir partículas de un material especial (absorbente en la longitud de onda de la fuente de luz utilizada) a alguno de los elementos que están en contacto con las partículas de estudio, en este caso se habla de la fibra óptica. Dado que se utilizó un láser de  $\lambda = 455 \text{ nm}$ , se emplearon nanopartículas de plata como material especial. Cuando la luz saliente de la fibra impacta a las nanopartículas adheridas en su cara, estas absorben la energía y la transforman en calor. Mientras mayor sea el número de partículas fotodepositadas en la cara de la fibra e incluso a lo largo de ella, la cantidad de calor generado aumenta. De la misma forma se genera una mayor cantidad de energía calorífica al aumentar la potencia de la luz utilizada. La dependencia de la energía respecto de la cantidad de partículas de plata adheridas y de la potencia de operación del láser proporciona una forma de controlar el desplazamiento de las partículas dieléctricas. Así, cuanto mayor es la magnitud de la fotodeposición, mayor es la velocidad de las partículas. De forma análoga se manifiesta un aumento en la velocidad de las partículas mientras mayor sea la potencia del láser.

Además de que las variables anteriormente mencionadas influyen en el movimiento de las partículas de PS, existen otras variables no controlables que también afectan al experimento, estas son la flotabilidad de las partículas y la fricción de estas con el fondo de la celda. La flotabilidad puede impedir la aglomeración de partículas en los alrededores de la fibra óptica porque, además de la fuerza termoforética, se presentan corrientes de convección en planos más alejados del fondo de la celda. Esto hace que una partícula flotante en estos planos sea primero atraída y posteriormente eyectada por las corrientes de convección. Cuando esto sucede la partícula se mueve en círculos. Por otro lado, se tiene que la fricción con la celda puede jugar a favor o en contra de la aglomeración. Si esta es leve, permitirá la desaceleración de las partículas hasta encontrar un equilibrio de fuerzas en la vecindad de la fibra óptica. Por el contrario, si esta es más fuerte o incluso llega al grado de mantener adheridas a las partículas, la fuerza termoforética no será suficiente para causar el desplazamiento deseado.

La inducción de movimiento sobre las micropartículas metálicas de plata no requirió fotodeposición puesto que estas ya de por sí son absorbentes. La única forma de controlar el movimiento de ellas es al cambiar la potencia del láser. Se observó que cuando el láser operó con una potencia de 110 mW, las partículas de plata presentan una aglomeración evidente en los alrededores de la fibra óptica hasta el minuto 9. Dado que se presentaron mociones atípicas en estos experimentos no fue posible dar una explicación consistente a los fenómenos observados, sin embargo, se plantearon tres hipótesis. En la primera se propone que el mecanismo responsable de la aglomeración en los alrededores de la fibra óptica es la fotoforesis de tipo  $\Delta\alpha$ , la cual se manifiesta como resultado del intercambio de momento entre el hemisferio irradiado de las partículas y las moléculas del medio circundante. Dicho con otras palabras, el calentamiento en el lado iluminado de las partículas ocasiona que las moléculas de esta vibren con mayor frecuencia, impactando a las moléculas del medio circundante. De esta forma, tanto las moléculas que forman parte de las micropartículas de plata como las que forman al medio colisionan entre sí de manera que las primeras ejercen un momento sobre las segundas y viceversa. En la segunda hipótesis se propone que el movimiento atractivo de las partículas ocurre por efectos de la termoforesis porque, en

la cercanía de la fibra óptica, cada partícula actúa como un calefactor que contribuye en la generación de un pequeño gradiente de temperatura que se suma a aquellos que han sido generados por las partículas vecinas. De esta forma se tiene una difusión térmica no uniforme en el medio huésped que acaba por impulsar a las partículas hacia la fibra. Por último, la tercera hipótesis se propone para dar explicación al movimiento de alejamiento respecto de la fibra que sufren las partículas a cierta distancia. Aquí simplemente se plantea la ocurrencia de fotoforesis indirecta negativa.

Cabe mencionar también que, tanto para las partículas que se movían hacia la fibra como para las que se alejaban de ella, la velocidad de desplazamiento y la magnitud de aglomeración son mayores en tanto sea mayor la potencia de operación del láser.

# Trabajo a futuro

A partir de las observaciones hechas y de los análisis realizados durante esta tesis, se propone la ejecución de los siguientes trabajos:

1. Hacer una aproximación de aglomerados por unidad de tiempo que considere la aglomeración volumétrica.
2. Realizar una investigación más profunda sobre los siguientes temas:
  - Caracterización del movimiento termoforético inducido por radiación láser sobre micropartículas dieléctricas suspendidas en un medio acuoso.
  - Análisis sobre la moción de micropartículas metálicas fuertemente absorbentes por acción de fenómenos fototérmicos estimulados por una fuente láser.

## Trabajos derivados de la tesis

Se participó en el Optics + Photonics Digital Forum, congreso promovido por SPIE (Society of Photographic Instrumentation Engineers), para ello el día 30 de Julio de 2020 se envió un manuscrito titulado "Migration of suspended silver microparticles in water by means of photophoresis induced with laser radiation". Posteriormente, el 17 de agosto del 2020, se envió un video acerca del mismo tema y el día 25 de Agosto del 2020 se presentó este video en el foro antes mencionado.

## REFERENCIAS.

- [1] **Author:** Aaron T. Ohta, Pei-Yu Chiou, Arash Jamshidi, Hsan-Yin Hsu, Justin K. Valley, Steven L. Neale y Ming C. Wu; **Year:** 2010; **Title:** “Chapter 18 Optoelectronic Tweezers for the Manipulation of Cells, Microparticles and Nanoparticles”; **Book:** Recent Optical and Photonic Technologies, **Publisher:** IntechOpen, **Pages:** 367-388.
- [2] **Author:** Min-Cheng Zhong, Xun-Bin Wei, Jinhua Zhou, Ziqiang Wang, Yin-Mei Li; **Year:** 2013; **Title:** “Trapping Red Blood Cells in Living Animals Using Optical Tweezers”; **Journal:** Nature Communications; **Vol:** 4; **Pages:** 1768(1-7).
- [3] **Author:** Jun Ando, Godofredo Bautista, Nicholas Smith, Katsumasa Fujita, Vincent Ricardo Daria; **Year:** 2008; **Title:** “Optical Trapping and Surgery of Living Yeast Cells Using a Single Laser”; **Journal:** Review of Scientific Instruments, **Vol:** 79, **Pages:** 103705(1–7).
- [4] **Author:** Zheng Zhang, Tom E.P. Kimkes, Matthias Heinemann; **Year:** 2019; **Title:** “Manipulating Rod-Shaped Bacteria With Optical Tweezers”; **Journal:** Scientific Reports **Vol:** 9, **Pages:** 19086(1-9).
- [5] **Author:** Sonia Bayouhd, M. Mehta, Halina Rubinsztein-Dunlop, N. R. Heckenberg, C. Chritchley; **Year:** 2001; **Title:** “Micromanipulation of Chloroplasts Using Optical Tweezers”; **Journal:** Journal of Microscopy; **Vol:** 203; **Pages:** 214-222.
- [6] **Author:** Reza Haghighi, Chien Chern Cheah; **Year:** 2015; **Title:** “Optical Micromanipulation of Multiple Groups of Cells”; **Journal:** Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation; **Vol:** 2015, **Pages:** 3543-3545.
- [7] **Author:** Krishna Neupane, Daniel A. N. Foster, Derek R. Dee, Hao Yu, Feng Wang, Michael T. Woodside, Xia Liu; **Year:** 2016; **Title:** “Direct Observation of Transition Paths During the Folding of Proteins and Nucleic Acids”; **Journal:** Science (New York, N. Y.); **Vol:** 352; **Pages:** 239-242.
- [8] **Author:** Makoto Tominaga, Yuki Higashi, Takuya Kumamoto, Takashi Nagashita, Teruyuki Nakato, Yasutaka Suzuki, Jun Kawamata; **Year:** 2018; **Title:** “Optical Trapping and Orientation Manipulation of 2D Inorganic Materials Using a Linearly Polarized Laser Beam”; **Journal:** Clays and Clay Minerals; **Vol:** 66; **Pages:** 138–145.
- [9] **Author:** Alexander S. Urban, Sol Carretero-Palacios, Andrey A. Lutich, Theobald Lohmüller, Jochen Feldmann, Frank Jäckel; **Year:** 2014; **Title:** “Optical Trapping and Manipulation of Plasmonic Nanoparticles: Fundamentals, Applications, and Perspectives”; **Journal:** Nanoscale; **Vol:** 6; **Pages:** 4458-4474.
- [10] **Author:** Manas Khan, A. K. Sood, Samarendra. K. Mohanty, Pradeep. K. Gupta, Girish V. Arabale, K. Vijaymohanan y C.N.R. Rao; **Year:** 2006; **Title:** “Optical trapping and transportation of carbon nanotubes made easy by decorating with palladium”; **Journal:** Optics Express, **Vol:** 14, **Pages:** 424-429.
- [11] **Author:** Kun Xin, Xiaofeng Shi, Yi Liu, Zimeng Zhang, Wenjie Jia, Jun Ma; **Year:** 2020; **Title:** “Method of Optical Manipulation of Gold Nanoparticles for Surface-Enhanced Raman Scattering in a Microcavity”; **Journal:** Optics Express, **Vol:** 28, **Pages:** 8734-8743.

- [12] **Author:** Junru Wu; **Year:** 1991; **Title:** “Acoustical Tweezers”; **Journal:** The Journal of the Acoustical Society of America; **Vol:** 89; **Pages:** 2140-2143.
- [13] **Author:** Steven B Smith, Laura Finzi, Carlos Bustamante; **Year:** 1992; **Title:** “Direct Mechanical Measurements of the Elasticity of Single DNA Molecules by Using Magnetic Beads”; **Journal:** American Association for the Advancement of Science; **Vol:** 258; **Pages:** 1122-1126.
- [14] **Author:** Iwijn De Vlaminck y Cees Dekker; **Year:** 2012; **Title:** “Recent Advances in Magnetic Tweezers”; **Journal:** Annual Review of Biophysics; **Vol:** 41; **Pages:** 453-472.
- [15] **Author:** Chenlin Zhang, Bingjie Xu, Chaoyang Gong, Jingtang Luo, Quanming Zhang, Yuan Gong; **Year:** 2019; **Title:** “Fiber Optofluidic Technology Based on Optical Force and Photothermal Effects”; **Journal:** Micromachines; **Vol:** 10; **Pages:** 499(1-25).
- [16] **Author:** A. Constable, Jinha Kim, J. Mervis, F. Zarinetchi, M. Prentiss; **Year:** 1993; **Title:** “Demonstration of a Fiber-Optical Light-Force Trap”; **Journal:** Optics Letters; **Vol:** 18; **Pages:** 1867-1869.
- [17] **Author:** Zhang Chen-Lin, Gong Chao-Yang, Yuan Gong, Rao Yun-Jiang, Peng Gang-Ding; **Year:** 2019; **Title:** “Optical Fiber Microfluidic Sensors Based on Opto-Physical Effects”; **Book:** Handbook of Optical Fibers; **Publisher:** Springer; **Pages:** 2283-2317.
- [18] **Author:** Yuchao Li, Hongbao Xin, Xiaoshuai Liu, Baojun Li; **Year:** 2015; **Title:** “Non-Contact Intracellular Binding of Chloroplasts in Vivo”; **Journal:** Scientific Reports; **Vol:** 5; **Pages:** 10925(1-9).
- [19] **Author:** Hongxiang Lei, Yao Zhang, Baojun Li; **Year:** 2012; **Title:** “Particle Separation in Fluidic Flow by Optical Fiber”; **Journal:** Optics Express; **Vol:** 20; **Pages:** 1292-1300.
- [20] **Author:** Abhay Kotnala, Yuebing Zheng; **Year:** 2019; **Title:** “Opto-Thermophoretic Fiber Tweezers”; **Journal:** Nanophotonics; **Vol:** 8; **Pages:** 475-485.
- [21] **Author:** YuPeng Cheng, JianXin Yang, ZongBao Li, DeBin Zhu, Xiang Cai, Xiaowen Hu, XiaoBo Xing; **Year:** 2017; **Title:** “Microbubble-Assisted Optofluidic Control Using a Photothermal Waveguide”; **Journal:** Applied Physics Letters; **Vol:** 111; **Pages:** 151903(1-5).
- [22] **Author:** Hongbao Xin, Hongxiang Lei, Yao Zhang, Xingmin Li, y Baojun Li; **Year:** 2011; **Title:** “Photothermal Trapping of Dielectric Particles by Optical Fiber-Ring”; **Journal:** Optics Express; **Vol:** 19; **Pages:** 2711-2719.
- [23] **Author:** Eugene Hecht; **Year:** 2017; **Title:** Momento y presión de radiación; **Book:** “Óptica, 5<sup>ta</sup> edición; **Publisher:** Pearson Educación; **Pages:** 59-61.
- [24] **Author:** Abdur Rahman, Ziad Saghir; **Year:** 2014; **Title:** “Thermodiffusion or Soret effect: Historical Review”; **Journal:** International Journal of Heat and Mass Transfer; **Vol:** 73; **Pages:** 693-705.
- [25] **Author:** Peter Geelhoed, Jerry Westerweel, Signe Kjelstrup, Dick Bedeaux; **Year:** 2015; **Title:** “Thermophoresis”; **book:** “Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics”; **Publisher:** Springer; **Pages:** 2061-2064.

- [26] **Author:** Anu Kumar Das, Saibal Chatterjee; **Year:** 2018; **Title:** “Analysis of Thermophoresis and Brownian Motion Effect in Heat Transfer for Nanofluid Immersed Distribution Transformer”; **Journal:** Electrical Engineering; **Vol:** 100; **Pages:** 1963-1974.
- [27] **Author:** Hitoshi Watarai, Hideaki Monjushiro, Satoshi Tsukahara, Masayori Suwa, Yoshinori Iiguni; **Year:** 2004; **Title:** “Migration Analysis of Micro-Particles in Liquids Using Microscopically Designed External Fields”; **Journal:** Analytical Sciences; **Vol:** 20; **Pages:** 423-434.
- [28] **Author:** Vadim L. Kononenko, J. K. Shimkus, J. C. Giddings y M. N. Myers; **Year:** 1997; **Title:** “Feasibility Studies on Photophoretic Effects in Field-Flow Fractionation of Particles”; **Journal:** Journal of Liquid Chromatography & Related; **Vol:** 20; **Pages:** 2907-2929.
- [29] **Author:** Vadim L. Kononenko, J. Calvin Giddings, Marcus N. Myers; **Year:** 1997; **Title:** “On the Possibility of Photophoretic Field-Flow Fractionation”; **Journal:** Journal of Microcolumn Separations; **Vol:** 9; **Pages:** 321-327
- [30] **Author:** Shahram Tehranian, Frank Giovane, Jürgen Blum, Yu-Lin Xu, A.S. Gustafson; **Year:** 2001; **Title:** “Photophoresis of micrometer-sized particles in the free-molecular regime”; **Journal:** International Journal of Heat and Mass Transfer; **Vol:** 44; **Pages:** 1649-1657.
- [31] **Author:** Helmuth Horvat; **Year:** 2013; **Title:** “Photophoresis – a Forgotten Force??”; **Journal:** KONA Powder and Particle Journal; **Vol:** 31 **Pages:** 181-199.
- [32] **Author:** Hans Rohatschek; **Year:** 2014; **Title:** “Photophoresis and accommodation”; **Journal:** Atmospheric and oceanic optics (Оптика атмосферы и океана); **Vol:** 27; **Pages:** 87-96.
- [33] **Author:** Olga Jovanovic; **Year:** 2009; **Title:** “Photophoresis—Light induced motion of particles suspended in gas”; **Journal:** Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer; **Vol:** 110; **Pages:** 889-901.
- [34] **Author:** Yu Shang, Xiaoyun Tang, Yaxun Zhang, Zhihai Liu, Xinghua Yang, Jianzhong Zhang, Jun Yang, Libo Yuan; **Year:** 2019; **Title:** “Optical attraction of strongly absorbing particles in liquids” **Journal:** Optics Express; **Vol:** 27; **Pages:** 12414-12423.