

# ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE MICROGOTAS Y SU INTERACCIÓN CON EPIs POR MEDIO DE TÉCNICAS LÁSER

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Física

Junio 2021

**Alberto Arcusa Puente**

**Directoras**

Dra. Virginia Palero Díaz

Marina Gómez Climente



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Velocimetría de imagen de partículas</b>	<b>1</b>
<b>3. Montaje experimental</b>	<b>3</b>
3.1. Sistema óptico . . . . .	3
3.2. Puesta a punto del montaje experimental . . . . .	4
3.2.1. Aumentos . . . . .	4
3.2.2. Apertura . . . . .	5
3.3. Aerosoles . . . . .	6
<b>4. Resultados experimentales</b>	<b>6</b>
4.1. Toma de datos y análisis PIV . . . . .	6
4.2. Spray . . . . .	8
4.2.1. Mascarilla quirúrgica . . . . .	9
4.2.2. Capas mascarilla quirúrgica . . . . .	10
4.2.3. Mascarilla casera . . . . .	10
4.2.4. Capas mascarilla casera . . . . .	11
4.3. Vapeador . . . . .	12
4.3.1. Mascarilla quirúrgica . . . . .	13
4.3.2. Capas mascarilla quirúrgica . . . . .	14
4.3.3. Mascarilla casera . . . . .	15
4.3.4. Capas mascarilla casera . . . . .	15
4.4. Prevalencia microgotas . . . . .	16
<b>5. Conclusiones</b>	<b>17</b>



# 1. Introducción

La pandemia por coronavirus ha afectado significativamente a nuestras vidas, no solo por la enfermedad en sí, sino también por todas las medidas impuestas para evitar la propagación de la enfermedad, como son el distanciamiento social, las restricciones de movilidad o el uso obligatorio de mascarilla. En este trabajo de fin de grado estudiaremos la eficacia de éstas últimas para bloquear el paso de aerosoles, que se ha demostrado que son responsables de la propagación del virus.

Dado que existen muchas clases distintas de mascarillas (quirúrgica, FFP2, de tela, deportiva, etc), analizaremos el comportamiento de dos tipos: la mascarilla quirúrgica y una mascarilla de tela, de fabricación casera, compuesta por la superposición de tres telas: algodón, filtro TNT y algodón hidrófugo. Someteremos estas mascarillas a dos condiciones diferentes. En primer lugar, estudiaremos el impacto sobre las mascarillas de las gotas que genera un spray de agua y que simularían las gotas expelidas en un estornudo. En segundo lugar, reproduciremos las microgotas que se expelen cuando respiramos o hablamos. También estudiaremos cada una de las capas que componen las mascarillas por separado.

Visualizaremos los aerosoles, su impacto en la parte interna de las distintas mascarillas (filtración) y veremos en qué caso las gotas atraviesan las distintas capas que componen la mascarilla. Mediremos también la velocidad de los aerosoles con la técnica de Velocimetría de Imagen de Partículas (denominado a partir de ahora PIV, por sus siglas en inglés), la cual permite medir simultáneamente dos componentes de la velocidad de un fluido en un plano. Se analizarán varios parámetros relacionados con el proceso de medida y el análisis de las imágenes: aumentos de la imagen, apertura óptima del objetivo, etc.

Además, visualizaremos la prevalencia en el aire de las microgotas originadas al hablar, recreadas con el vapeador, para comprobar cuánto tiempo pueden permanecer las microgotas en el aire en lugares cerrados y mal ventilados.

Por último, indicar que se está visualizando y midiendo un fluido tridimensional con técnicas bidimensionales. Este trabajo de fin de grado es una primera aproximación al problema de medir la interacción entre los aerosoles y los EPIs. Un trabajo futuro contemplaría medidas del flujo tridimensional con PIV estereoscópico (SPIV) y holografía.

## 2. Velocimetría de imagen de partículas

Para la visualización de la efectividad de las distintas mascarillas frente al paso de las microgotas bastaría con un análisis visual, en el que observaríamos si atraviesan la mascarilla o se desvían. Pero para conocer la velocidad de las microgotas necesitamos realizar un análisis cuantitativo. El PIV (Particle Image Velocimetry) es una técnica óptica no intrusiva que permite medir las dos componentes (2C) de la velocidad en un plano de un fluido (2D) [1], proporcionando una medida global del campo de velocidades

en ese plano. Para ello se expande un haz láser por medio de una lente cilíndrica para crear un plano de luz e iluminar el fluido. Una cámara digital, cuyo eje óptico es perpendicular al plano iluminado, registrará las imágenes del fluido en movimiento a intervalos de tiempo conocidos. En PIV se registra la luz dispersada por trazadores que siguen el movimiento del fluido. En este caso, los trazadores son las gotas generadas por los distintos aerosoles.

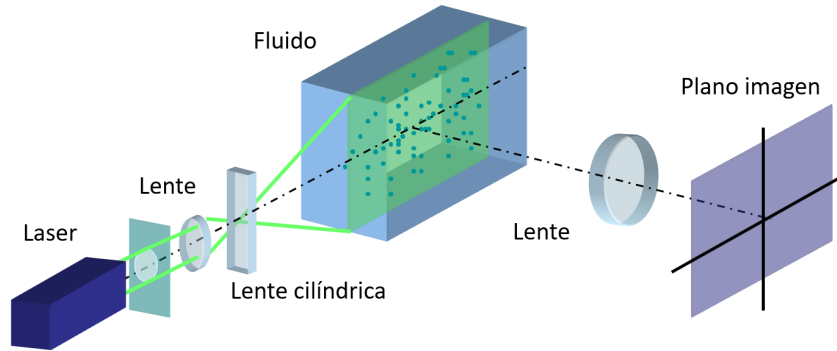


Figura 1: Esquema del montaje para el registro de imágenes PIV

Para obtener la velocidad, la luz dispersada por las microgotas se registra en dos instantes de tiempo. Midiendo el desplazamiento ( $\vec{d}$ ) de las partículas y conociendo el intervalo de tiempo  $\Delta T$  entre las dos exposiciones, obtenemos la velocidad local como  $\vec{V} = \vec{d}/\Delta T$ .

Para evitar registrar un promedio temporal de las imágenes, al ser un proceso dinámico, tenemos que “congelar” la imagen de las partículas. Esto lo conseguimos ajustando el tiempo de exposición de acuerdo con la velocidad del fluido. Por lo general, el tiempo de exposición es del orden del microsegundo ( $\mu s$ ). En el caso de usar láseres pulsados, el tiempo de exposición viene dado por la duración del pulso.

Para obtener el desplazamiento de las partículas calculamos la correlación entre dos exposiciones [2]. Para ello, se dividen las imágenes en ventanas de interrogación y se calcula, para la misma ventana en ambas imágenes, la función de correlación cruzada. Se obtiene un pico notorio, cuya posición respecto al centro de la función indica el desplazamiento promedio de las partículas en dicha ventana (Figura 2).

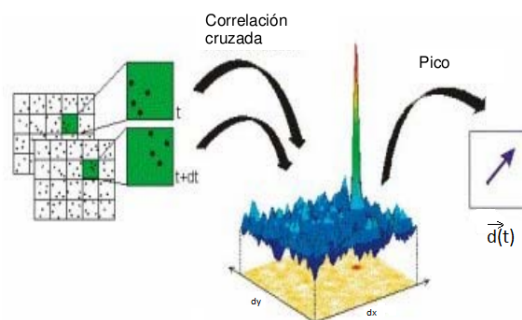


Figura 2: Esquema en el que se muestra como se obtiene el desplazamiento en PIV

Este proceso se repite para todas las ventanas de interrogación de la imagen, generando un mapa de vectores. El desplazamiento máximo que se puede medir es del orden del tamaño de la ventana, si aumentamos ésta, aumentamos el rango de medida, pero disminuimos la resolución espacial. La velocidad se obtiene dividiendo  $d$  entre el tiempo entre exposiciones.

### 3. Montaje experimental

#### 3.1. Sistema óptico

Para realizar las medidas en este trabajo se utilizó el sistema cuyo esquema se muestra en la Figura 3.

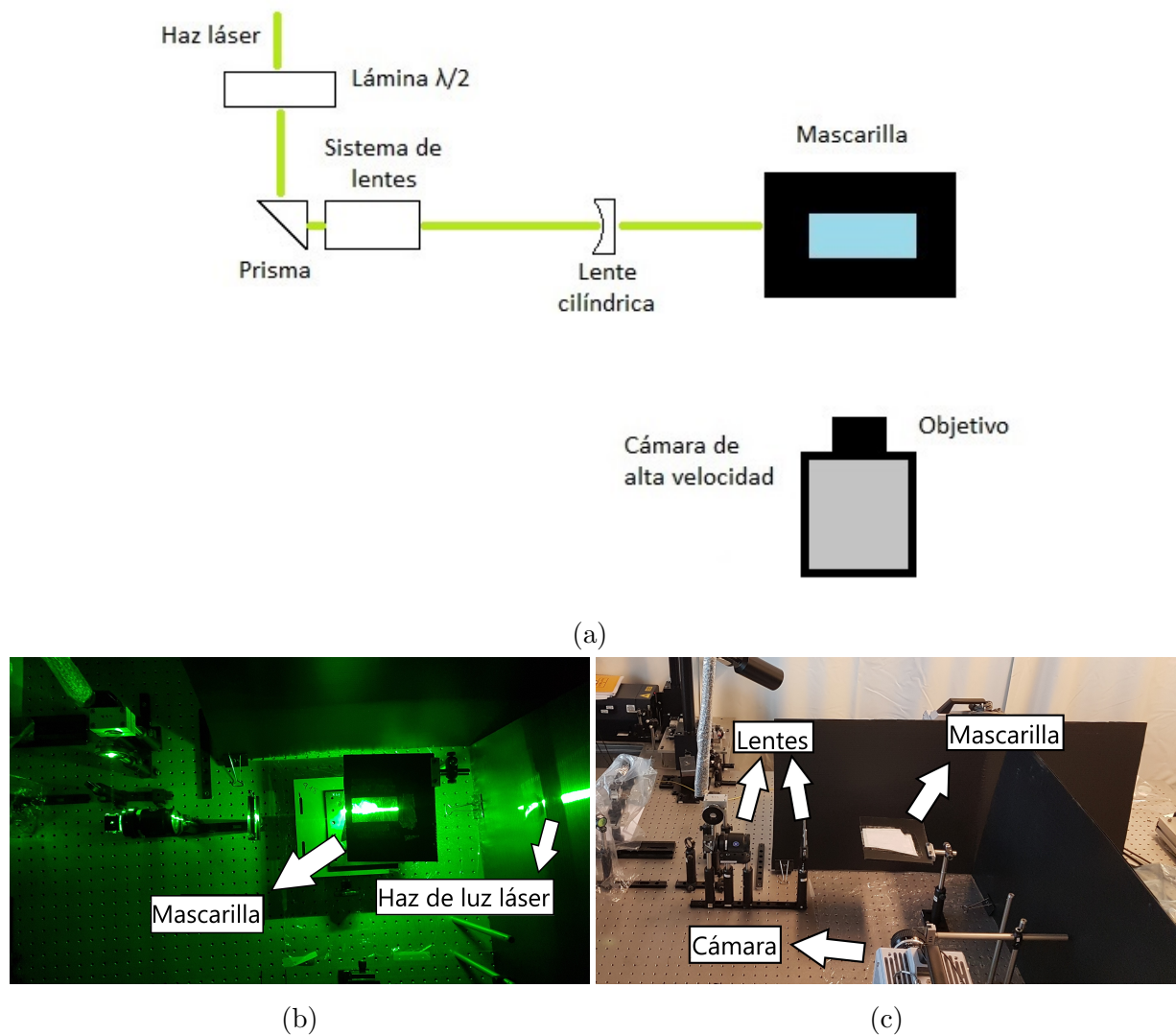


Figura 3: (a) Esquema del montaje para la realización de las medidas. (b) Vista superior del montaje. (c) Vista lateral del montaje.

El plano de luz lo generamos a partir de un láser pulsado de alta velocidad de doble cavidad New Wave Pegasus, (Nd:YLF bombeado con un diodo). La luz del láser la llevamos por medio de un brazo óptico a la zona de medida. Un conjunto de lentes esféricas y cilíndricas produce el plano de luz, de un grosor de menos de 1mm y una altura de 85mm, que ilumina un plano transversal la mascarilla (Figura 3b).

La cámara de alta velocidad Photron Fastcam SA2 cuenta con un objetivo Nikon Nikkor de focal,  $f'$ , 50mm. Los pulsos del láser están sincronizados con la cámara para asegurar que el fluido está iluminado cuando se graba la imagen. Los parámetros más relevantes del montaje óptico se resumen en la Tabla 1.

Láser	Tipo	Estado sólido Nd:YLF
	Longitud de onda	527 nm
	Frecuencia de repetición máxima	10 KHz
	Energía del pulso a 1KHz	10 mJ
	Ancho del pulso a 1KHz	<120 ns
Cámara	Modelo	Photron Fastcam SA2
	Resolución	2048x2048 pixeles, 12-bit
	Tamaño del pixel	10 $\mu\text{m}$ x 10 $\mu\text{m}$
	Frecuencia de adquisición	1000 imagenes/segundo
Objetivo	Modelo	Nikon Nikkor 50
	Distancia focal	50 mm
	Apertura	f/16 - f/1.2

Tabla 1: Parámetros del montaje óptico PIV

La mascarilla se coloca paralela a la mesa, perpendicular a la dirección de propagación del haz láser de forma que la cámara permite ver encima y debajo de la misma. El spray se coloca debajo de la mascarilla, de forma que las gotas se desplazan de abajo hacia arriba, impactando con la parte interior de la mascarilla. El proceso de medida se realiza sincronizando la pulsación del spray con el sistema de registro. Se toman imágenes desde el inicio de la pulsación hasta el tiempo máximo que permite la cámara (1.3s).

## 3.2. Puesta a punto del montaje experimental

### 3.2.1. Aumentos

Es importante conocer los aumentos del sistema, para calcular correctamente los desplazamientos, pues el PIV nos da el desplazamiento en pixels y tenemos que pasarlo a unidades del SI. Los aumentos  $M$  del sistema óptico se definen como  $M = \frac{y'}{y}$ , donde  $y'$  es el tamaño de la imagen e  $y$  el tamaño del objeto. En nuestro caso el tamaño de la imagen viene dado por el tamaño del sensor, que viene dado por el número de pixels multiplicado por el tamaño de un pixel,  $y' = 2048 \times 10 \cdot 10^{-6}\text{m} = 20,48\text{mm}$ . Para medir  $M$  colocamos una escala (nuestro objeto), hecha con papel milimetrado, en el plano de luz y contamos



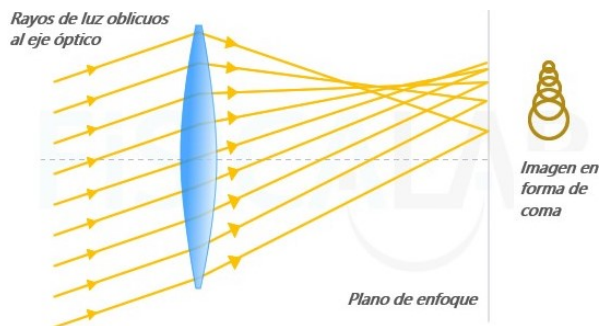
el área que se registra en la imagen.

Con la primera posición de la cámara podíamos registrar un tamaño del objeto de  $y = 98\text{mm}$  en el papel milimetrado, lo que supone unos aumentos del sistema  $M=0.21$ . Aumentamos la distancia de la cámara al objeto lo máximo que nos permitió el soporte para visualizar toda la mascarilla. Esta nueva disposición nos permitió observar una zona del objeto  $y = 132\text{mm}$  en el papel milimetrado, por lo que los aumentos del sistema son  $M=0.15$ .

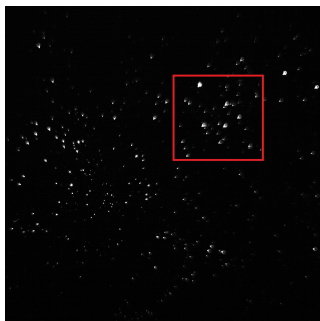
### 3.2.2. Apertura

La apertura del sistema se relaciona con la profundidad de enfoque. Si abrimos la apertura al máximo ( $f/1.2$ ) la profundidad de enfoque disminuye, lo que permite enfocar mejor el plano iluminado. Sin embargo, esta configuración nos generaba mucho coma (Figura 4). El coma es una aberración propia de las imágenes de puntos alejados del eje óptico, que aparece cuando las aperturas son grandes [3]. En este caso los rayos de luz procedentes del objeto convergen en distintos puntos del plano imagen, generando una imagen distorsionada.

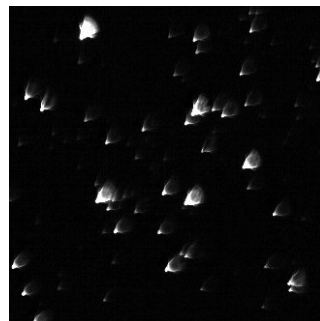
En la Figura 4a [4] se muestra cómo se genera el coma, mientras que en la Figura 4b mostramos un ejemplo de las imágenes que obtenemos. Se aprecia que el coma afecta especialmente a las imágenes más alejadas del eje óptico.



(a)



(b)



(c)

Figura 4: (a) Esquema de la generación de la aberración óptica coma. (b) Imagen registrada con coma. (c) Zona recuadrada en rojo ampliada donde se aprecia claramente las imágenes de las partículas con coma.

Finalmente, usamos una apertura ( $f/5.6$ ). Con una apertura más pequeña el tamaño de las imágenes de las partículas aumenta, por lo que ocupan más pixels. Esto favorece la medida del campo de velocidades con PIV, ya que mejora el cálculo de la función de correlación cruzada.

### 3.3. Aerosoles

Para simular los dos aerosoles con los que rociaremos las mascarillas utilizamos dos generadores de gotas distintos.

En primer lugar, para simular las gotas expelidas en un estornudo vamos a utilizar un spray corriente (Figura 5a) relleno de agua. Las microgotas generadas al hablar las recrearemos con el vapeador *VAPOR STORM PUMA BABY* (Figura 5b) a 50W de potencia, el cual contiene una mezcla de propilenglicol (70 %) y glicerina (30 %). Se trata de un dispositivo comercial. Se eligió debido al trabajo publicado por Keiko et al (2021) [5]. Según este trabajo, las microgotas que genera este vapeador tienen un tamaño entre 0.1 y 1  $\mu m$ , parecido al de las microgotas producidas en la respiración humana.



(a)



(b)

Figura 5: (a) Spray para simular las gotas de un estornudo. (b) Vapeador para simular las microgotas expelidas al hablar.

## 4. Resultados experimentales

### 4.1. Toma de datos y análisis PIV

La cámara de alta velocidad se sincroniza con los dos pulsos del láser para adquirir las imágenes de los aerosoles en dos frames distintos. Un esquema de la secuencia de adquisición se muestra en la Figura 6. La frecuencia de la cámara se fija a 1000 imágenes/s y la frecuencia de cada láser en 500Hz.

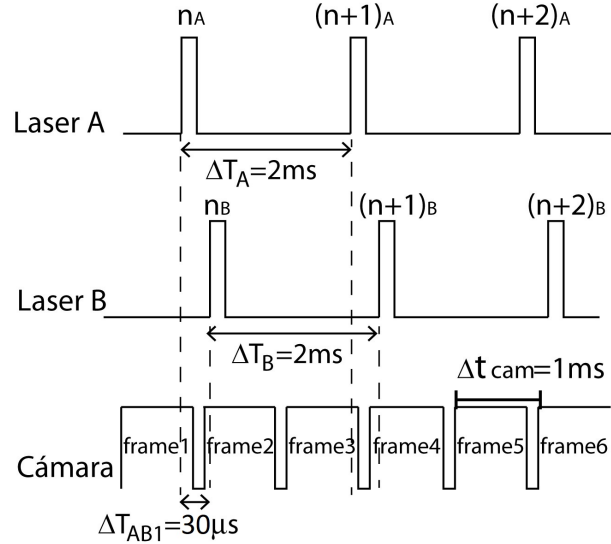


Figura 6: Secuencia de adquisición para la captura de imágenes PIV.

El tiempo entre los pulsos láseres se escoge de manera que se aprecie desplazamiento de la partícula entre ambas imágenes, pero que éste no sea excesivo, pues en el cálculo de correlación cruzada necesitamos que la partícula en ambas imágenes esté dentro de la misma ventana de interrogación. En nuestro caso, para el spray utilizamos un intervalo de tiempo entre los dos pulsos de  $\Delta T = 30\mu\text{s}$ , mientras que para el vapeador se tomó  $\Delta T = 2\text{ms}$ . Es decir, sólo utilizamos los pulsos de uno de los láseres, pues la velocidad de las microgotas era tan baja que con intervalos del orden del microsegundo no observábamos ningún desplazamiento.

Los campos de velocidades se obtienen con *Davis7.2*, un software comercial de *LaVision* [6]. Primero se realiza un procedimiento denominado *copy and reorganize*, en el cual agrupamos las imágenes (que se han registrado como una serie temporal) en parejas, para poder realizar posteriormente la correlación cruzada. El análisis de PIV se lleva a cabo en dos pasos: En primer lugar se dividen las imágenes en ventanas de interrogación de  $64 \times 64$  pixels con un solapamiento del 50%, lo que nos da una primera estimación del desplazamiento local. En el segundo paso, se reduce el tamaño de la ventana a  $32 \times 32$  (sin solapamiento) lo que proporciona una medida más precisa y mayor resolución espacial en el campo de velocidades.

Las imágenes que se muestran a continuación han sido adaptadas para obtener una visualización adecuada. Para ello se ha variado la escala de grises usando el programa *Adobe Photoshop* [7].

En las imágenes con el vapeador de las capas que sí atravesaban las microgotas usamos una corrección de los niveles de gris distinta para la zona superior e inferior de la mascarilla, pues las microgotas que atraviesan son tan tenues que con un cambio de la escala de grises global saturamos la zona inferior (donde impactan las microgotas) de la mascarilla.

## 4.2. Spray

En primer lugar sometemos las mascarillas a las gotas generadas por el spray, que simularán las condiciones dadas en un estornudo. Para comprobar que esto es cierto, analizamos las características de las gotas liberadas por el spray. Mostraremos la visualización del spray libre en 3 situaciones: una inicial, con las gotas saliendo del dosificador del spray (Figura 7a), una situación intermedia (Figura 7b) en el que las gotas están concentradas en el centro, y una situación final (Figura 7c) donde las gotas están dispersas por todo el espacio. El tiempo transcurrido entre el inicio y el final es de 0.19 s.

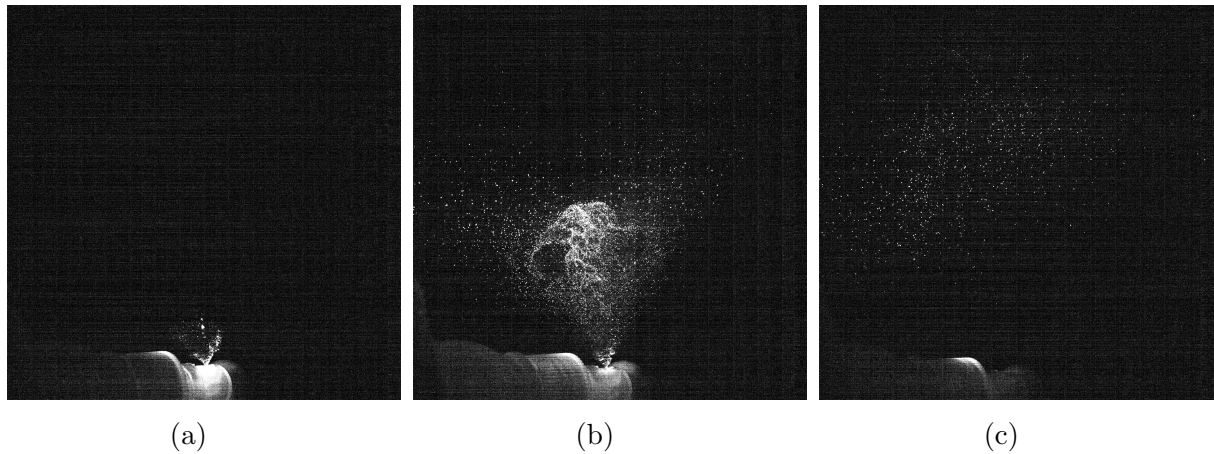


Figura 7: (a) Inicio de la expulsión. (b) Situación intermedia con mayor velocidad. (c) Situación final con menor velocidad y las gotas más dispersas.

En los mapas de velocidades vemos que las gotas salen del dosificador a una velocidad máxima de 14-16 m/s (Figura 8a), pero en la situación intermedia (Figura 8b), a la que impactará en la mascarilla, la velocidad es de 4-6 m/s. Por lo que el spray se comporta, en cuanto a la velocidad, como un estornudo [8].

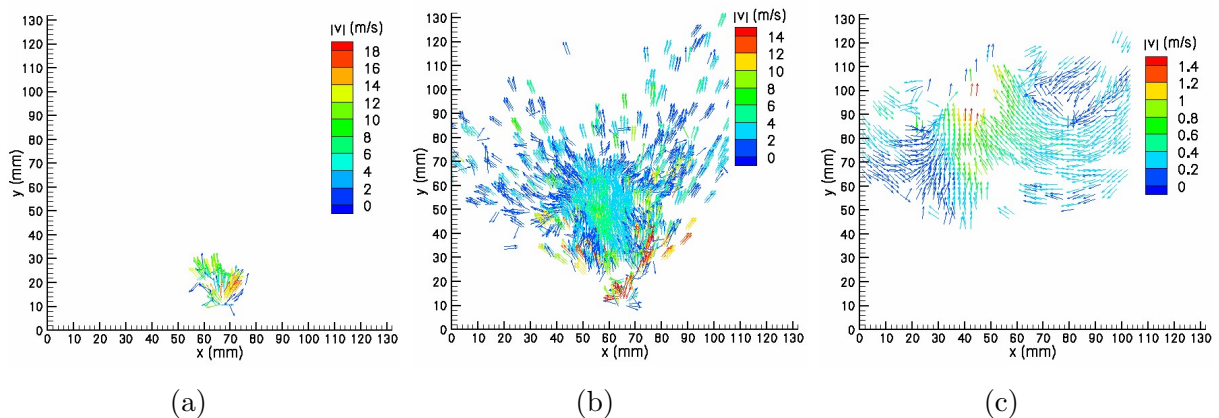


Figura 8: Mapas de velocidades de: (a) situación inicial, (b) situación intermedia, (c) situación final.

Nótese que la escala de velocidades es diferente en cada mapa, lo que nos permite optimizar la información obtenida en cada uno de ellos.

#### 4.2.1. Mascarilla quirúrgica

La mascarilla quirúrgica cubre parcialmente el rostro y es utilizada, sobre todo, por el personal médico y sanitario para contener bacterias y virus provenientes de la nariz y la boca del portador de la misma. Las mascarillas quirúrgicas se están utilizando en estos momentos por la población en general debido a la COVID 19. Están compuestas de tres capas: la capa externa, resistente a la penetración de fluidos; el filtro intermedio; y la capa blanca interna, que es suave y está en contacto con la piel. El rendimiento de estas mascarillas se evalúa en función de parámetros tales como filtración (captura de máscaras de aerosoles exhalados), exposición (transferencia de aerosoles desde el exterior), resistencia del flujo de aire de la mascarilla (diferencia de presión durante la respiración,  $\Delta P$ , también conocida como transpirabilidad), resistencia a la penetración de líquidos, permeabilidad al aire y al vapor de agua y repelencia al agua [9]. Nuestro estudio se va a limitar a visualizar la interacción entre la parte interna de la mascarilla y dos tipos de aerosoles. Es decir, visualizaremos la filtración de la mascarilla.

Someteremos la mascarilla quirúrgica a las gotas generadas por el spray. Para ello colocaremos la boquilla a una distancia de 5 cm, para que el impacto se dé bajo la condición de velocidad de estornudo.

En la situación intermedia (Figura 9b), que muestra el impacto de las gotas con la mascarilla quirúrgica, no apreciamos el paso de gotas a través de esta. En la situación final (Figura 9c) observamos que las gotas se desplazan hacia los laterales de la mascarilla generando vórtices. El tiempo transcurrido entre el inicio y el final es de 0.11s.

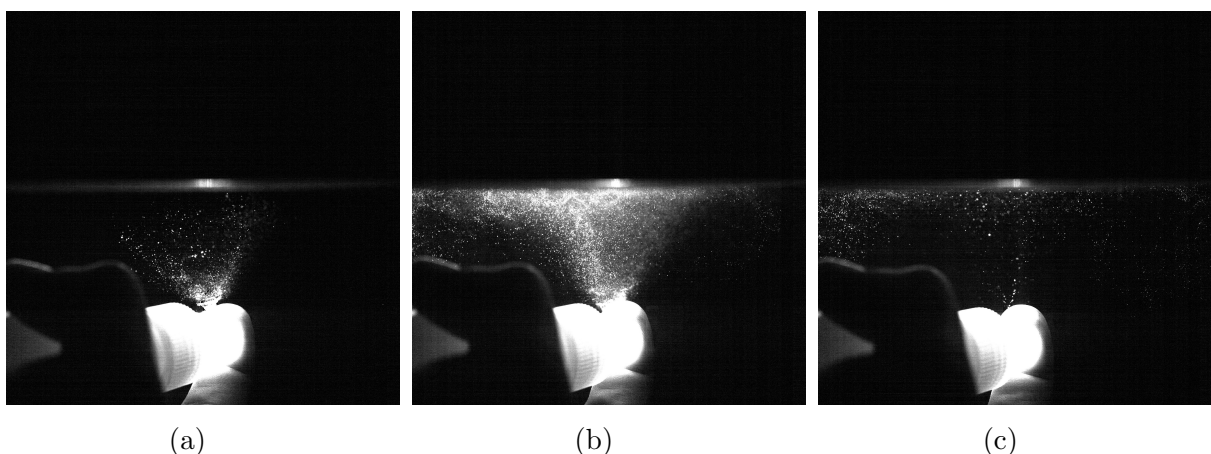


Figura 9: (a) Inicio del rociamiento. (b) Situación intermedia en la que el aerosol impacta en la mascarilla. (c) Situación final.

### 4.2.2. Capas mascarilla quirúrgica

Desmontando la mascarilla podemos estudiar cada una de sus capas por separado. Comprobamos que la única capa que impide el paso de gotas es el filtro intermedio (Figura 10b), mientras que tanto en la azul externa (Figura 10a) como en la blanca interna (Figura 10c) las gotas pasan sin aparente dificultad.

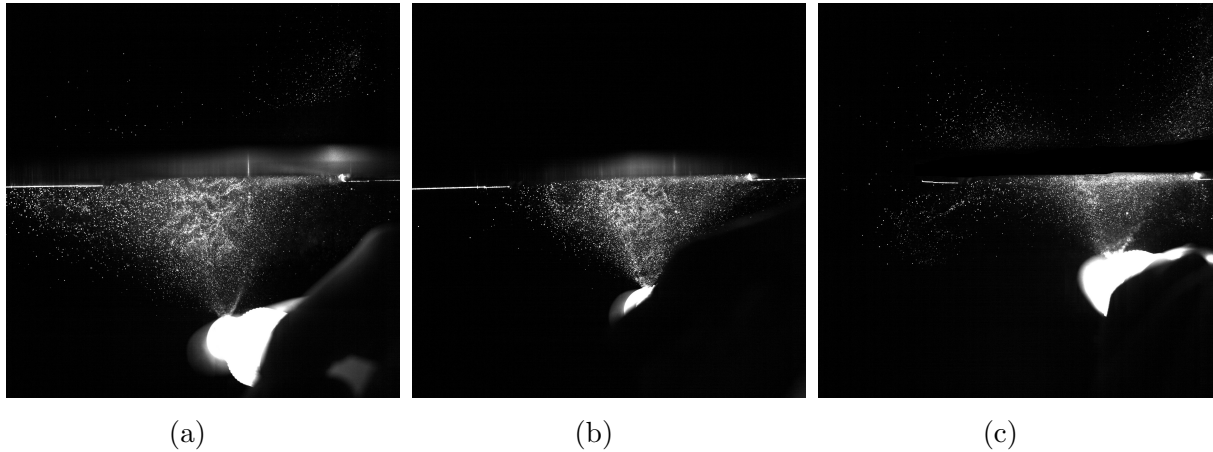


Figura 10: (a) Capa azul externa. (b) Filtro intermedio. (c) Capa blanca interna.

Ampliando la zona del espacio tras la mascarilla, podemos apreciar mejor el claro paso de gotas tanto en la capa azul externa (Figura 11a) como en la blanca interna (Figura 11b).

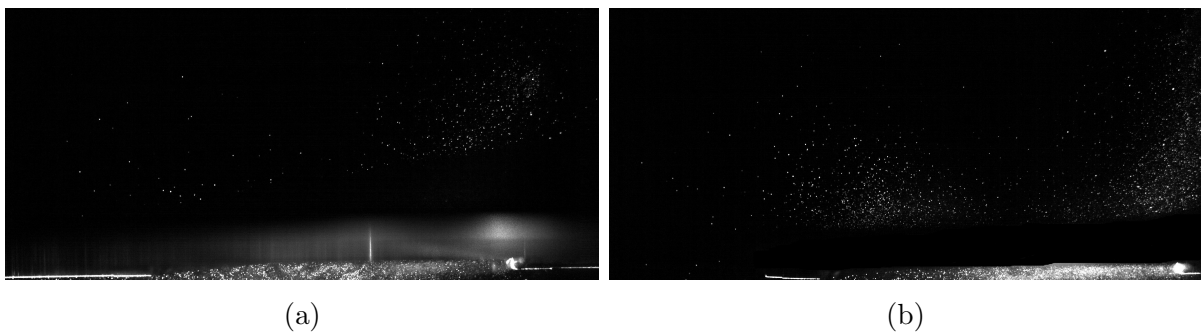


Figura 11: Visualización de la filtración de las capas de la mascarilla: (a) azul externa. (b) blanca interna.

Observamos que en la zona justo encima de la mascarilla no se ven gotas. Esto es debido a la sombra que proyecta el soporte que aguanta la mascarilla, por lo que las gotas presentes en esa región no están iluminadas.

### 4.2.3. Mascarilla casera

En la mascarilla casera, compuesta de una tela de algodón exterior, un filtro TNT intermedio y una tela de algodón hidrófugo, no observamos el paso de las gotas durante

el impacto (Figura 12b). De nuevo, en la situación final (Figura 12c), las gotas se dirigen hacia los laterales de la mascarilla. El tiempo transcurrido entre el inicio y el final es de 0.13s.

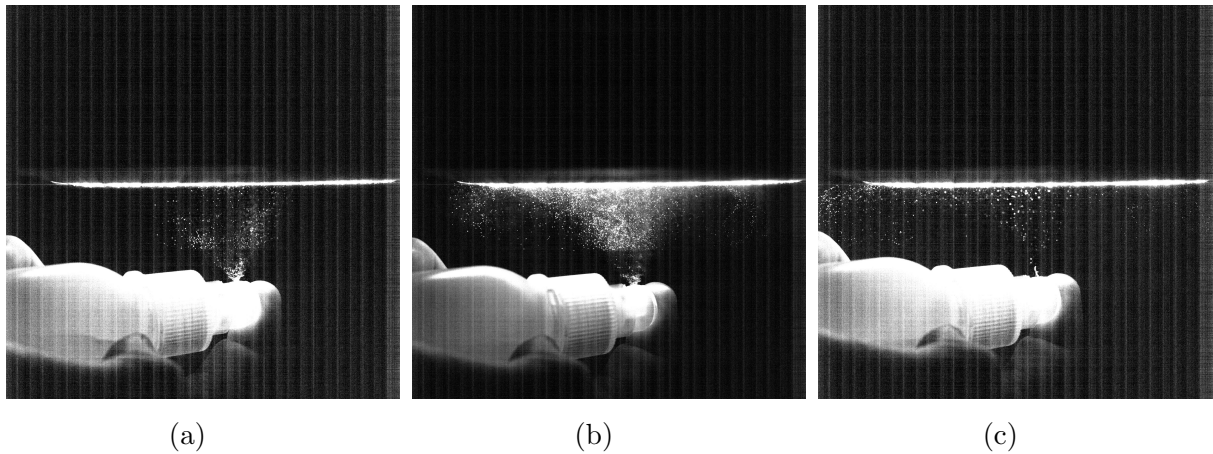


Figura 12: (a) Inicio del rociamiento. (b) Situación intermedia en la que el aerosol impacta en la mascarilla. (c) Situación final.

Observamos un patrón de líneas verticales que aparece al cambiar la escala de grises. El patrón no afecta a la medida y es originado por el prolongado uso de la cámara de alta velocidad, la cual iba perdiendo la calibración de fondo inicial.

#### 4.2.4. Capas mascarilla casera

Estudiamos cada una de las capas de la mascarilla casera. En este caso sí apreciamos el paso de algunas pocas gotas en todas las capas.

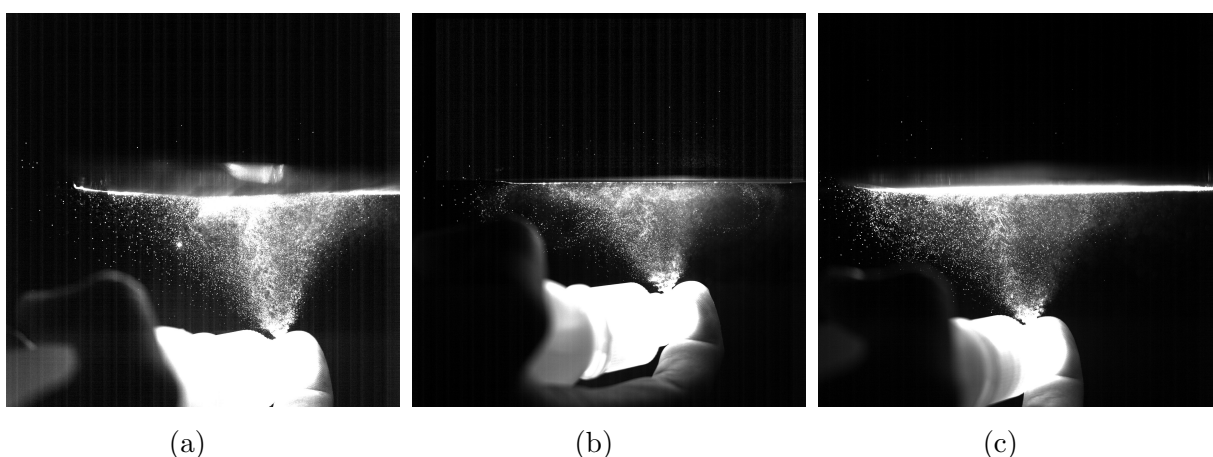
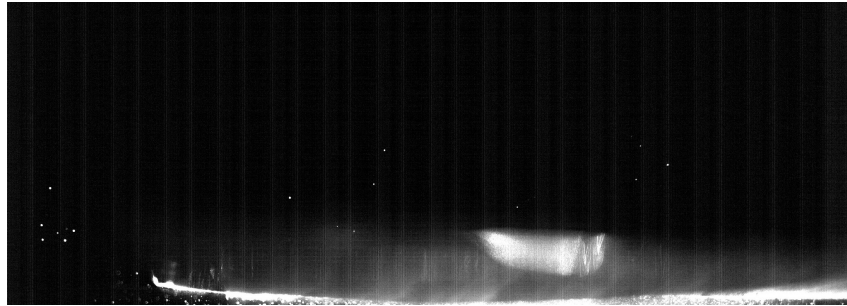


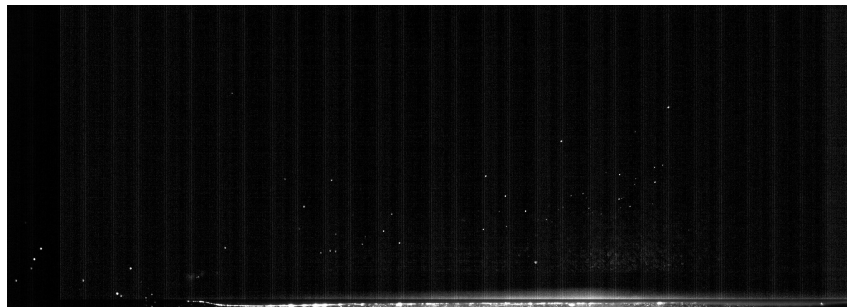
Figura 13: (a) Tela de algodón. (b) Filtro TNT. (c) Tela algodón hidrófugo.

Ampliando la zona superior de la mascarilla apreciamos mejor el paso de las gotas. Tanto en la tela de algodón (Figura 14a) como en la de algodón hidrófugo (Figura 14c)

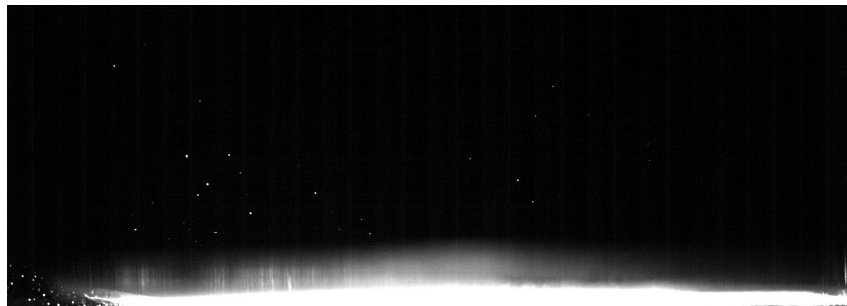
el paso de gotas es similar. En el filtro TNT (Figura 14b) el paso de gotas es ligeramente superior.



(a)



(b)



(c)

Figura 14: Visualización de la filtración de las telas: (a) algodón, (b) filtro TNT, (c) algodón hidrófugo.

### 4.3. Vapeador

Con el vapeador simularemos las microgotas expelidas al hablar. Presentamos en primer lugar la visualización del aerosol generado por el vapeador. En un instante inicial (Figura 15a) se aprecia que están las microgotas muy agrupadas. Se van dispersando posteriormente (Figura 15b), hasta que, finalmente, se dispersan (Figura 15c). Este proceso de dispersión lo realizan siguiendo estructuras de vórtices. El tiempo transcurrido entre el inicio y el final es de 0.65 s.



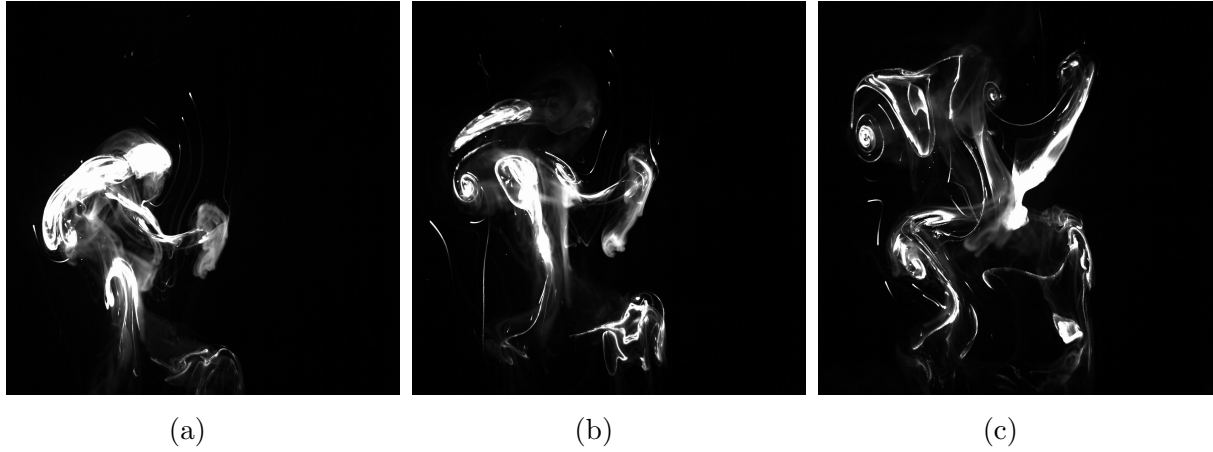


Figura 15: (a) Situación inicial con las microgotas concentradas. (b) Situación intermedia con las microgotas empezando a dispersarse. (c) Situación final con las microgotas más dispersas.

Si calculamos los mapas de velocidades obtenemos una media de 0.3-0.4 m/s en la velocidad de desplazamiento de las microgotas. Es decir, el vapeador recrea las condiciones dadas en una exhalación [8].

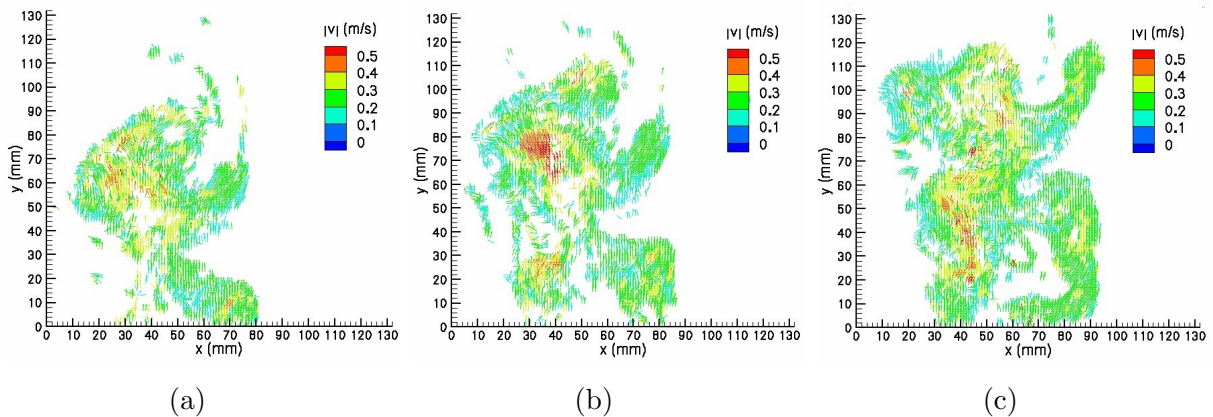


Figura 16: Mapas de velocidades de: (a) situación inicial, (b) situación intermedia, (c) situación final.

#### 4.3.1. Mascarilla quirúrgica

Para el estudio del impacto de las microgotas del vapeador con la mascarilla quirúrgica, colocaremos la boquilla del vapeador a una distancia de 3cm para intentar reproducir una situación lo más realista posible y que, al mismo tiempo, nos permita visualizar y medir.

En la situación inicial (Figura 17a) observamos las microgotas saliendo del vapeador, en la situación intermedia (Figura 17b) las microgotas impactan con la mascarilla. En la situación final (Figura 17c) las microgotas se desvían hacia los laterales de la mascarilla. Vemos que en el impacto, las microgotas no atraviesan la mascarilla. El tiempo

transcurrido entre el inicio y el final es de 0.72s.

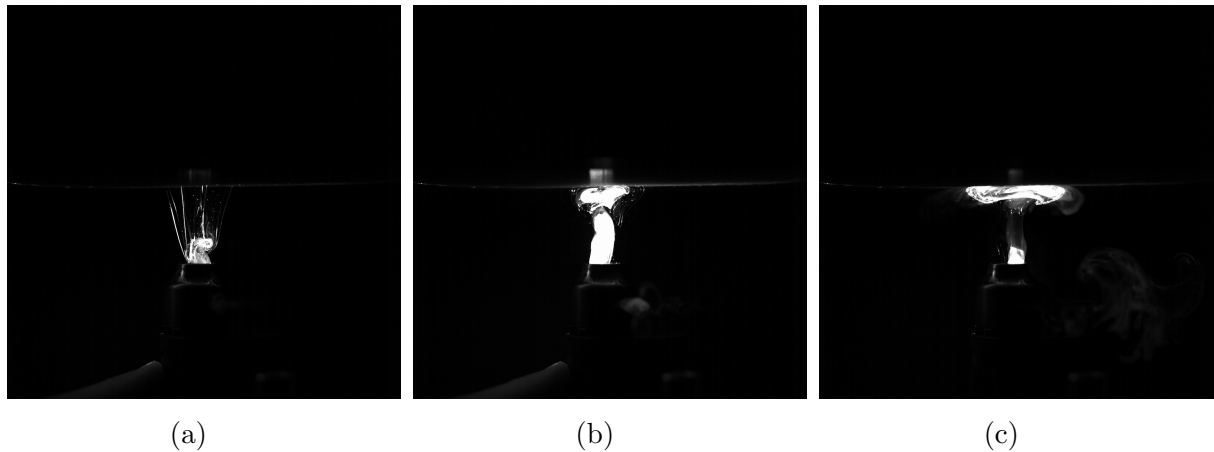


Figura 17: (a) Situación inicial del rociamiento. (b) Situación intermedia donde no se aprecia que las microgotas atraviesen la mascarilla. (c) Situación final con las microgotas desviándose hacia los laterales.

#### 4.3.2. Capas mascarilla quirúrgica

De nuevo, realizamos el estudio de las capas de la mascarilla quirúrgica por separado. En esta ocasión sí apreciamos el paso de las microgotas en las tres capas. Debido a la menor velocidad de las microgotas, el paso de estas no se observa justo con el impacto con la mascarilla sino en instantes posteriores.

En la capa azul exterior (Figura 18a) observamos las microgotas que han atravesado en la zona superior derecha. En el filtro intermedio (Figura 18b) no observamos el paso de microgotas. Y en la capa blanca interna (Figura 16c) las microgotas que atraviesan están en la zona izquierda. Estas zonas, delimitadas con un cuadro rojo, se han ampliado para facilitar su visualización.

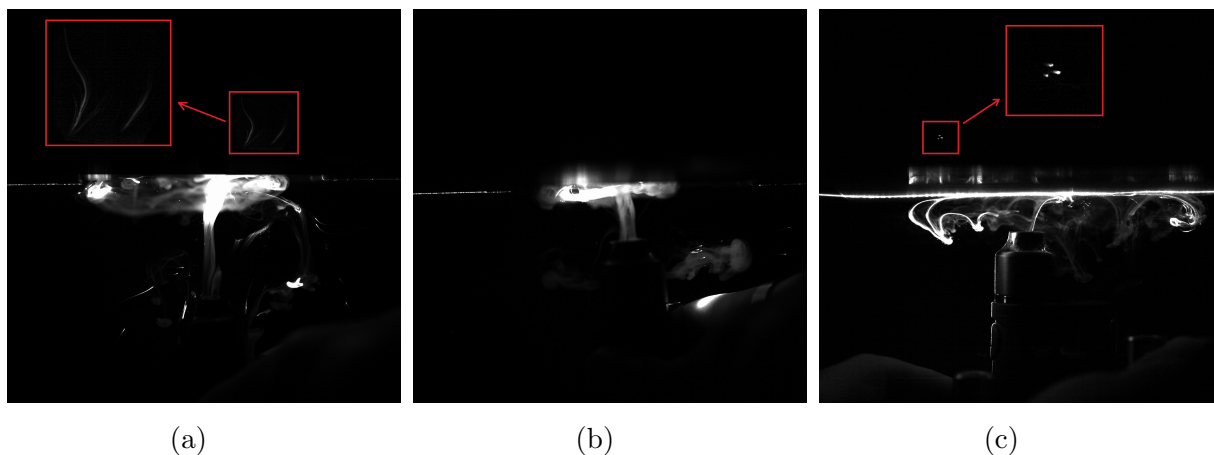


Figura 18: (a) Capa azul externa. (b) Filtro intermedio. (c) Capa blanca interna.

### 4.3.3. Mascarilla casera

El estudio realizado con la mascarilla casera no muestra paso de microgotas en el instante del impacto (Figura 19b) ni en instantes posteriores (Figura 19c).

En este caso, en la situación final (Figura 19c), las microgotas se desvían hacia el lateral derecho de la mascarilla, esto puede ser debido a una corriente fortuita de aire del laboratorio. El tiempo transcurrido entre el inicio y el final es de 0.85s.

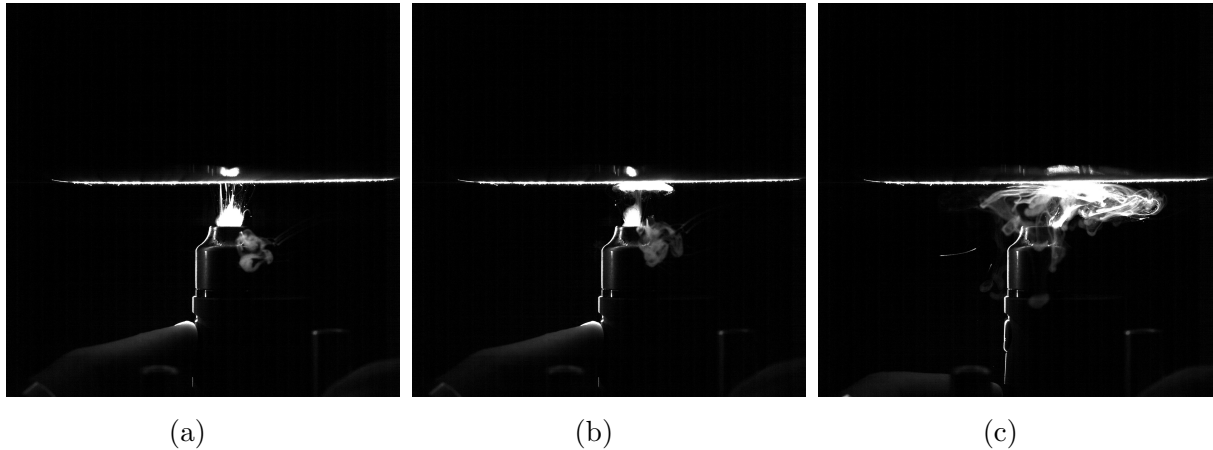


Figura 19: (a) Situación inicial. (b) Situación intermedia donde no se aprecia el paso de microgotas. (c) Situación final con las microgotas desviándose hacia la derecha.

### 4.3.4. Capas mascarilla casera

Separando las capas para realizar un estudio individual de cada una de ellas encontramos el mismo resultado que con el spray, en todas pasan microgotas.

En la capa de tela de algodón (Figura 20a) y en el filtro TNT (Figura 20b) las microgotas que han atravesado se aprecian en la zona superior izquierda. En la tela de algodón hidrófugo (Figura 20c), se encuentran en la zona central.

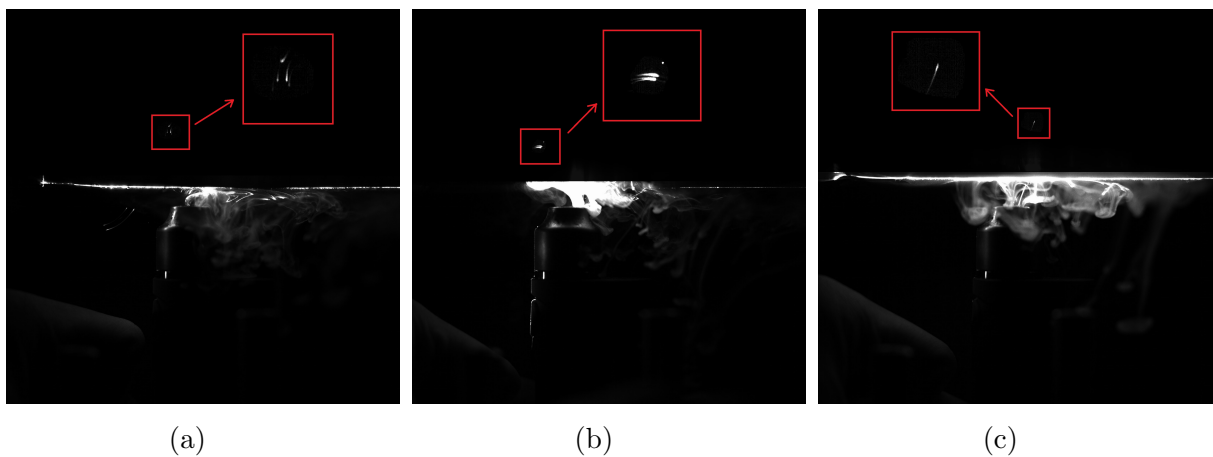


Figura 20: (a) Tela de algodón. (b) Filtro TNT. (c) Tela algodón hidrófugo.

#### 4.4. Prevalencia microgotas

Por último, vamos a analizar la prevalencia de las microgotas generadas al hablar, utilizando el vapeador. Las condiciones en las que se realiza el experimento simulan un entorno pequeño cerrado con mala ventilación. Para ello, se cierran puertas y ventanas del laboratorio. La parte de la mesa óptica donde se encontraba el láser y la zona donde se lleva a cabo el registro de las imágenes estaba cerrada por gruesas cortinas que impedían el paso de la luz ambiental. Estas cortinas no suponen ninguna restricción al movimiento de las gotas, si bien evitan las corrientes de aire.

Observamos en un instante inicial (Figura 21a) un grupo compacto de microgotas, las cuales se desplazan a la derecha (Figura 21b) tal vez por una corriente de convección hasta salir del plano de la imagen, pero pasados unos segundos vuelven a entrar al plano de la imagen por la izquierda (Figura 21c) y se van desplazando más (Figura 21d) hasta que pasado un minuto ya no se distingue ninguna estructura de vórtice sino microgotas dispersas (Figura 21e).

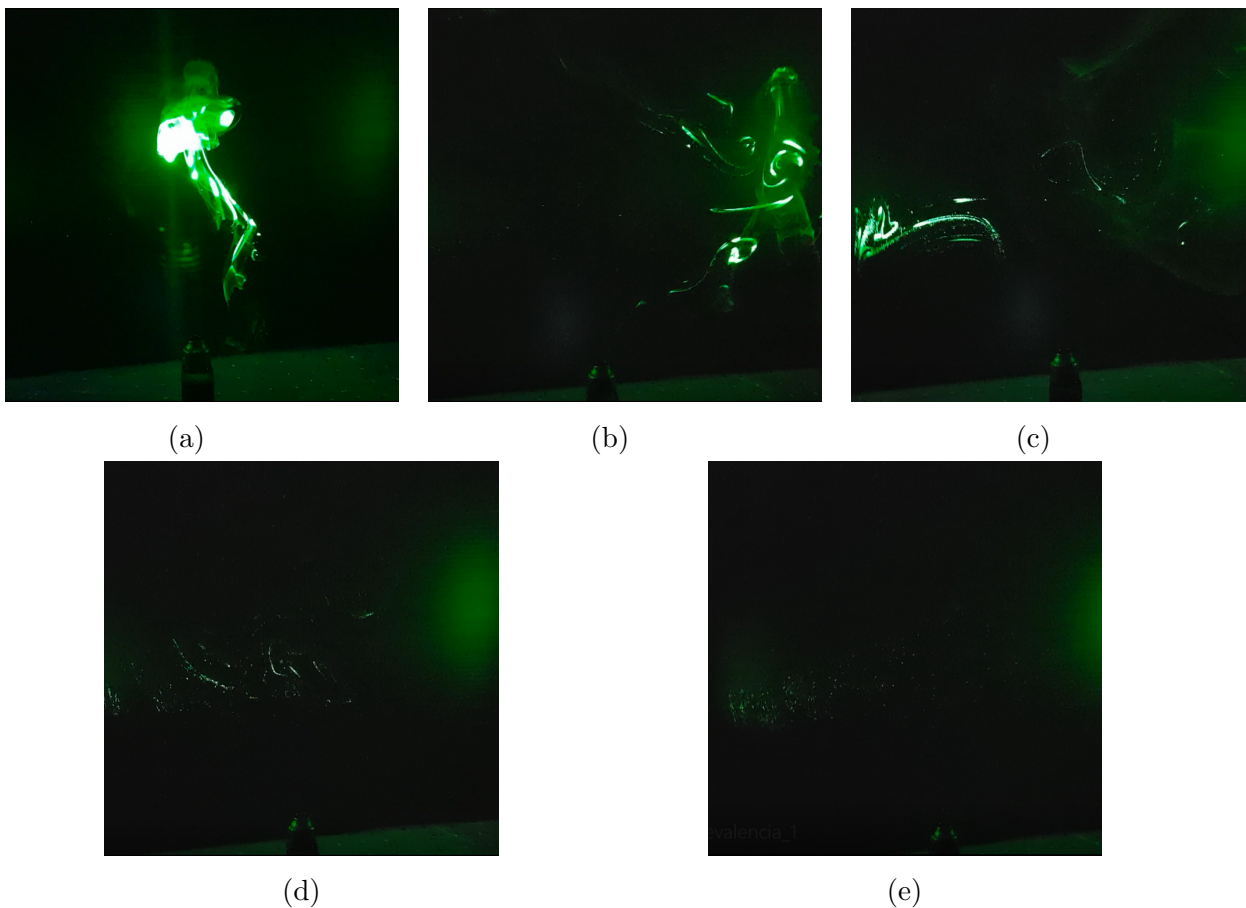


Figura 21: Situación de la propagación de las microgotas del vapeador con una mala ventilación a tiempo: (a)  $t=1s$ . (b)  $t=5s$ . (c)  $t=15s$ . (d)  $t=30s$ . (e)  $t=60s$ .

## 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la mascarilla quirúrgica filtra las microgotas adecuadamente, impidiendo su paso, tanto bajo condiciones de estornudo como de una exhalación normal. También muestran que, en ambas condiciones, la capa encargada de impedir el paso de las microgotas es el filtro intermedio. La misión de las otras capas es proteger al filtro de la humedad y otros agentes externos.

La mascarilla casera, compuesta de las dos capas de tela de algodón y el filtro, impide el paso de las microgotas bajo ambas condiciones, pero cada una de las telas y el filtro por separado no impiden el paso de la totalidad de las microgotas. Luego las mascarillas caseras son igual de efectivas, en las condiciones de este experimento, que las quirúrgicas, siempre y cuando se hagan mediante la superposición de las tres telas, pues solo una capa de estas no impide el paso de las microgotas.

También se observa que las microgotas, tras el impacto con la mascarilla, se desplazan hacia los laterales. Por lo que las mascarillas deben quedar bien ajustadas a la cara para impedir que las microgotas se escapen, o entren, por los huecos que quedan entre la piel y el borde de la mascarilla.

El estudio de la prevalencia muestra una duración de más de un minuto de las microgotas en el aire en un entorno cerrado y mal ventilado. De ahí la importancia de la ventilación en entornos cerrados como oficinas, aulas, ascensores, transporte público... pues aunque en el momento en el que entremos no haya nadie, puede haber microgotas contaminadas en el aire.

Por último, el estudio realizado en este trabajo de fin de grado se puede completar en el futuro aplicando técnicas de medida tridimensionales, como el PIV estereoscópico (SPIV) y holografía, para la medida de la propagación e impacto de los aerosoles en todo tipo de EPIs.

## Referencias

- [1] Westerweel J., «Fundamentals of digital particle image velocimetry,» Meas. Sci. Technol., vol. 8, pp. 1379-1392, 1997.
- [2] Adrian, Ronald J., «Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics,» Annu. Rev. Fluid Mech, vol. 23, pp. 261-304, 1991.
- [3] Justiniano Casas, «Óptica,» Coop. de Artes Gráficas Librería General, 7<sup>a</sup> edición, 1994.
- [4] «<https://www.fisicalab.com/sites/all/files/contenidos/optica/coma.jpg>,» [En línea]
- [5] Keiko I., Yoshiko O., Maiko O., Noriko O., «Relationship between human exhalation diffusion and posture in face-to-face scenario with utterance,» Phys. Fluids 33, 027101, 2021.
- [6] «<http://www.lavision.de/en/products/davis.php>,» [En línea]
- [7] «<https://www.adobe.com/es/products/photoshop.html>,» [En línea]
- [8] Tang, J. W., Nicolle, A. D. G., Klettner, C. A., Pantelic, J., Wang, L., Suhaimi, A. B., Tan, A. Y. L. et al., «Airflow dynamics of human jets: Sneezing and breathing-potential sources of infectious aerosols,» PLoS One 8(4), e59970, 2013.
- [9] «[https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1scara\\_quir%C3%BArgica](https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1scara_quir%C3%BArgica),» [En línea]