

# Detección de luz en medios turbios: simulaciones de Monte-Carlo para imagen activa usando luz polarizada o detección resuelta en el tiempo

## Light detection in turbid media: Monte-Carlo simulations for active imaging using polarized light or time-resolved detection

Maria BALLESTA <sup>(1)</sup>, Sara PEÑA-GUTIÉRREZ<sup>(1)</sup>, Santiago ROYO <sup>(1)</sup>

1. Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-CD6), Rambla Sant Nebridi 10, E08222, Terrassa, Spain

Persona de contacto: Maria Ballesta ([maria.ballesta.garcia@upc.edu](mailto:maria.ballesta.garcia@upc.edu)).

### RESUMEN:

La obtención de imágenes en condiciones climatológicas adversas (como niebla, lluvia y neblina), es uno de los problemas que afecta actualmente la investigación en el campo de la navegación, como resultado del creciente interés por los vehículos autónomos combinados con el uso de sensores fotónicos. Entre las distintas propuestas para resolverlo encontramos el uso de imágenes polarimétricas y la detección de luz resuelta en el tiempo. En este trabajo presentamos dos modelos basados en el método de Monte-Carlo para analizar la aplicabilidad y eficiencia de estas dos técnicas: uno de la interacción entre la luz polarizada y las partículas dispersas en el medio, y otro de la detección de luz en medios dispersivos resuelto en el tiempo.

**Palabras clave:** Monte-Carlo, propagación de la luz, medios turbios, dispersión

### ABSTRACT:

Imaging through nebulous media encountered in nature - like fog, rain, and light haze - is one of the up-to-date research questions in the field of navigation as a result of the recent interest in autonomous vehicles linked to the use of photonic sensors. Among different approaches to solve this problem the use of polarimetric imaging and time-resolved detection has been proposed. The aim of this communication is to present two models based on Monte-Carlo simulations for its use as tools to study the feasibility and characteristics of these two imaging techniques: the interactions between polarized light and scattering particles present in this kind of medium and, in parallel, time-resolved propagation in scattering scenarios.

**Key words:** Monte-Carlo, light propagation, turbid media, scattering

## 1.- Introducción

La obtención de imágenes de objetos escondidos tras un ambiente turbio puede tener un amplio beneficio en una gran variedad de campos como son el diagnóstico médico, la detección remota o el transporte. Concretamente, encontrar formas que permitan optimizar los métodos para obtener imágenes de largo alcance en condiciones climatológicas

adversas, como en presencia de niebla o lluvia, es de gran importancia para el desarrollo de los nuevos vehículos autónomos, especialmente en un momento en que los sistemas de visión que se proponen son fuertemente dependientes de sistemas basados en fotónica. Actualmente, la principal solución se basa en el uso de ondas de radio para las cuales la nie-

bla es transparente [1]. Sin embargo, estas frecuencias conllevan numerosas limitaciones, principalmente en cuanto a la resolución espacial que se puede llegar a obtener, que limita fuertemente los detalles observables en la imagen. Por ello, la mayoría de sistemas de sensores desarrollados para vehículos autónomos incorpora sistemas basados en tecnologías ópticas. Una de las grandes líneas de investigación existentes, conocida hace tiempo, es el uso de iluminación activa en el rango visible. Las propuestas en este campo están orientadas, en general, a diferenciar los distintos tipos de luz dispersada que llegan de regreso al detector para encontrar aquella que nos dé más información sobre el objeto que se desea detectar.

En esta comunicación no centramos en dos de las técnicas que están presentando resultados más prometedores. Una de ellas es aquella que utiliza la polarización de la luz, es decir, la imagen polarimétrica. Varias implementaciones experimentales que hacen uso de este enfoque muestran la mejora del contraste en imágenes de largo alcance obtenidas en situaciones de meteorología adversa, en los cuales sistemas de imagen convencional son incapaces de proveer información clara de la escena [2]. Adicionalmente, destacan también las técnicas de imagen resueltas en el tiempo [3], básicamente las que hacen uso del *time-gating*, es decir, que permiten separar la luz que proviene de la dispersión atmosférica de aquella que ha interactuado con algún objeto, además, idealmente, da la posibilidad de proporcionar información relacionada con la distancia a la cual se encuentra el obstáculo detrás del medio turbio [4].

Los montajes experimentales relacionados con la simulación de medios con las condiciones atmosféricas dispersivas deseadas, son costosos, y sobre todo difíciles de controlar y modificar, por el hecho de tener un gran número de variables, que no siempre es posible controlar. Es por este motivo que proponemos el desarrollo de modelos basados en el método de Monte-Carlo que contemplen la simulación de las propiedades de los dos técnicas consideradas con el objetivo de la evaluación de sus diferencias, la configuración experimental óptima, su aplicabilidad y su eficiencia, para el estudio previo a la maduración de los montajes experimentales.

## 2.- Métodos

La teoría de transporte radiativo (*radiative transport equation*) proporciona una descripción matemática para el fenómeno de la transferencia de energía en forma de radiación electromagnética a través de un medio absorbente y dispersivo. Su aplicación en sistemas reales es limitada, ya que las soluciones son consideradas analíticamente inviables debido al elevado costo computacional necesario para subdividir el objeto de interés en un número de elementos suficientemente pequeños.

Existen diferentes técnicas que permiten la obtención de soluciones aproximadas, entre las cuales destacamos como principal herramienta la simulación computacional con el método de Monte-Carlo (MC) [5]. MC es una técnica robusta y precisa con la que se pueden simular procesos físicos mediante el uso de un modelo estocástico. En el caso que nos concierne, el de la propagación de luz, permite registrar la historia de los fotones a medida que estos son dispersados y absorbidos en el medio; asumiendo que los eventos de dispersión son independientes e ignorando los efectos de coherencia. De este modo se obtienen los desplazamientos esperados de cada uno de los fotones que son tratados como partículas de luz que se mueven de acuerdo a ciertas funciones de densidad de probabilidad que dependen de las características del medio (coeficiente de absorción  $\mu_a$ , coeficiente de dispersión  $\mu_s$  y factor de anisotropía  $g$ ). A grandes rasgos, se define un paquete de energía que es introducido en el espacio considerado. Este paquete viaja una cierta distancia aleatoria  $s = \ln RND / (\mu_a + \mu_s)$ , en donde RND es un número aleatorio uniformemente distribuido entre 0 y 1, hasta un punto en donde algo ocurre: la energía que transporta disminuye de acuerdo a  $\mu_a$ , según la ley de Beer-Lambert, y el paquete es dispersado hacia una nueva dirección descrita por dos ángulos de dispersión: el ángulo azimutal  $\Phi$  y el ángulo de deflexión  $\Theta$ , este último determinado mediante el uso de una función de distribución de la dispersión basada en la función de Henyey-Greenstein (que depende de  $\mu_s$  y  $g$ ). Esto se repite hasta que el paquete escapa del espacio considerado o la energía del paquete queda

por debajo de un determinado umbral. A continuación, este proceso se repite para un nuevo paquete [6].

Una vez desarrollado el modelo, y antes de su aplicación al análisis de los problemas deseados, es necesario verificar que el modelo se ajusta adecuadamente a aquellos casos sencillos para los cuales la teoría de transporte radiativo tiene una solución analítica. Así, cuando la absorción prevalece sobre la dispersión ( $\mu_a \gg \mu_s$ ) se puede aplicar la ley de Beer-Lambert (ver Fig. 1). O bien, en determinadas condiciones del régimen dispersivo ( $\mu_s \approx 10\mu_a$ ), para el estado estable y en medios homogéneos sin fuentes, la solución analítica también es conocida (ver Fig. 2) [7]. En ambos casos, se comprueba cómo las simulaciones se ajustan perfectamente al modelo, así como también que se cumple el principio de conservación de la energía.

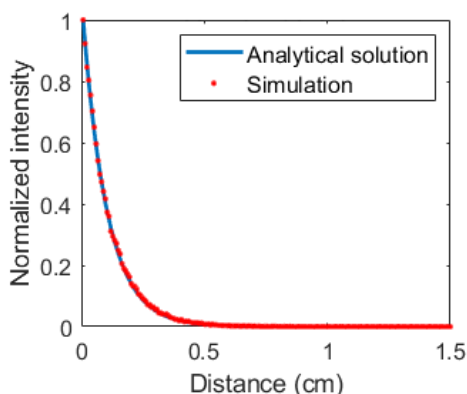


Fig. 1: Ley de Beer-Lambert. Propagación de luz en un medio con  $\mu_a = 10\text{cm}^{-1}$ ,  $\mu_s = 0.05\text{cm}^{-1}$ ,  $g = 0.9$ .

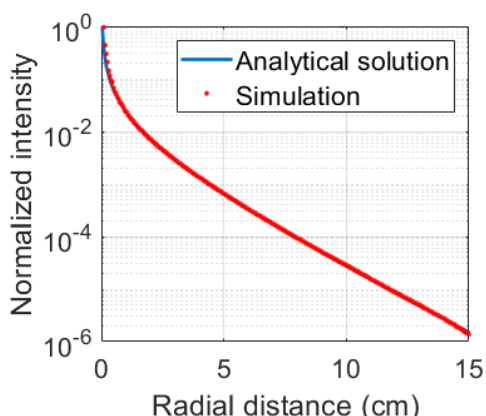


Fig. 2: Régimen de difusión. Propagación de luz en un medio con  $\mu_a = 0.05\text{cm}^{-1}$ ,  $\mu_s = 20\text{cm}^{-1}$ ,  $g = 0.2$

### 2.1.- Imagen resuelta en el tiempo

Dado el interés en la solución de la propagación de la luz en función del tiempo, esta variable ha sido considerada en el modelo previamente descrito. Para ello se ha modificado el código de MC añadiendo un registro del historial temporal de cada paquete de energía. Mediante el uso de este historial es posible generar el perfil temporal de potencia óptica. El tiempo que cada paquete resta en el espacio se obtiene dividiendo la longitud del camino recorrido entre la velocidad de la luz en ese medio [8].

En este caso, también se ha usado una situación con un resultado analítico conocido para verificar el modelo como se muestra en la Fig. 3. Específicamente, el caso de un medio difusor infinito con una fuente puntual [9]. De nuevo, el ajuste de modelo teórico y simulado es perfecto.

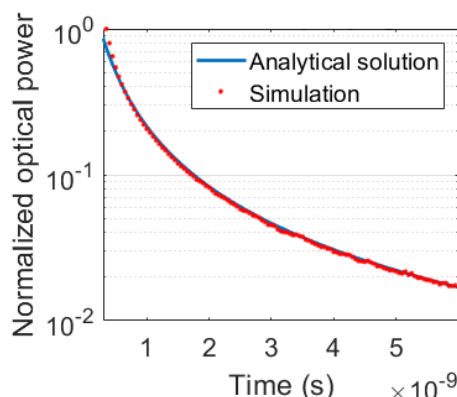


Fig. 3: Propagación de luz en un medio con  $\mu_a = 0\text{cm}^{-1}$ ,  $\mu_s = 2\text{cm}^{-1}$ ,  $g = 0.9$ , resuelta en el tiempo.

### 2.2.- Imagen polarimétrica

La siguiente modificación del código de MC consiste en añadir los efectos de polarización para simular la imagen polarimétrica. La incorporación de la polarización en este tipo de algoritmos se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante la formulación de Stokes-Mueller. La polarización y la intensidad de luz se especifican mediante el vector de Stokes  $S = (I, Q, U, V)$ . A su vez, cada evento de dispersión tiene asociado una matriz de Mueller  $M$  que contiene las propiedades dispersivas del medio, en este caso llamada también matriz de dispersión. Estas matrices pueden ser deducidas rigurosamente mediante el uso de

la teoría de Mie, que resuelve analíticamente el problema de difusión de luz a causa de partículas esféricas de radio e índice de refracción conocido [10]:

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{12} & m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & -m_{34} \\ 0 & 0 & m_{34} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

En donde el subíndice  $i$  denota el estado de polarización incidente,  $s$  el vector de Stokes resultante de la dispersión y  $m$  corresponde a cada uno de las componentes de la matriz  $\mathbf{M}$  calculadas mediante la teoría de Mie, y dependen (además de las variables mencionadas anteriormente) del ángulo de dispersión  $\theta$  de aquel evento (ver Fig. 4).

En este modelo es de vital importancia el correcto cálculo del vector de polarización dispersado y, para ello, el correcto cálculo del valor de  $m$  para cada evento. Además, cabe destacar que  $\mathbf{M}$ , está definida en el llamado plano de dispersión (generado por la dirección de propagación de la luz incidente y la dirección de dispersión) mientras que en general los vectores  $S$  se definen respecto a su plano meridiano (formado por la dirección de propagación y el eje principal) [11]. Por ello, es necesario incluir un conjunto de rotaciones angulares a los vectores de Stokes antes y después de aplicarles la matriz de Mueller:

$$S_s = \mathbf{R}(\gamma_2) \mathbf{M}(\theta) \mathbf{R}(\gamma_1) S_i \quad (2)$$

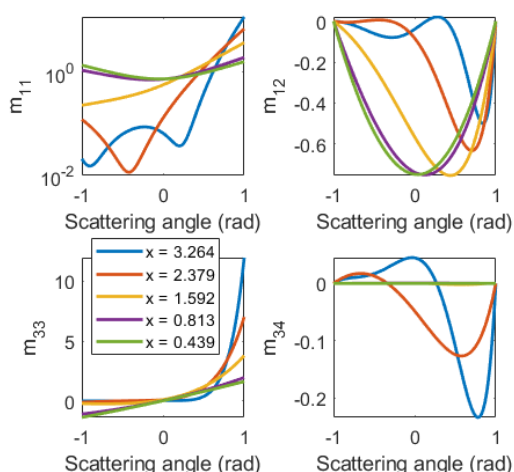


Fig. 4: Componentes de la matriz  $\mathbf{M}$  en función de  $\theta$  para distintos parámetros de tamaño  $x$  y índice de refracción  $n=1.2$ .

### 3.- Resultados

Una vez desarrollado cada uno de los modelos, se tiene libertad para el estudio del comportamiento de aquellas variables concretas que nos interesan. En esta sección presentamos algunas de las figuras resultantes obtenidas hasta ahora.

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo es usar estos modelos para mejorar y desarrollar técnicas de obtención de imagen a largo alcance mediante iluminación activa. Por ello, los resultados sobre los que nos centramos son aquellos relacionados con la luz retro-dispersada y reflejada del objeto escondido tras el medio turbio que llega de vuelta al plano de iluminación.

En la Fig. 5, se muestra el perfil temporal de la señal de luz enviada (1 mJ de energía) y recibida de vuelta al plano de iluminación para un medio con  $\mu_a$  y  $\mu_s$  pequeñas y  $g \approx 1$ , con un objeto a una distancia de 0.5 m. Se puede observar también que la posición del pico de luz reflejada nos permite obtener la información de la posición del objeto y que la integral de ambos perfiles cumple con la energía esperada de la propagación calculada a partir de la ecuación de rango [12].

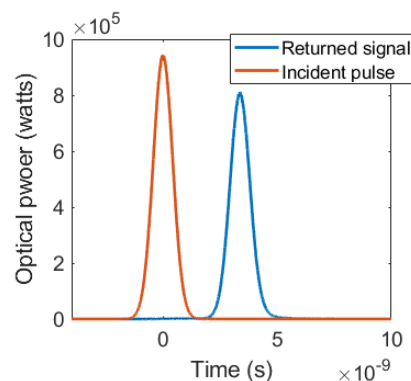


Fig. 5: Señal enviada y señal recibida para un medio con  $\mu_s = 0.01 \text{cm}^{-1}$  y  $g = 0.9$ , con la presencia de un obstáculo a 0.5 m.

La siguiente figura (ver Fig. 6) muestra distintos perfiles de luz retro-dispersada en un espacio libre para distintos coeficientes de dispersión. Como es de esperar, a mayor dispersión, mayor es la cantidad de energía *backscattered*. A continuación, en la Fig. 7, mostramos los perfiles temporales bajo las mismas condiciones, pero con la presencia de un objeto a 0.5 m. Se observa que alrededor de la posición

esperada del objeto aparece el pico correspondiente a su presencia que se suma a la contribución de la retro-dispersión. Además, es posible evaluar a partir de qué nivel de dispersión ya no se puede detectar el objeto (no es distinguible de la señal de *backscattering*), por lo que no sería posible obtener su imagen, como por ejemplo para el caso  $\mu_s = 50 \text{ m}^{-1}$ .

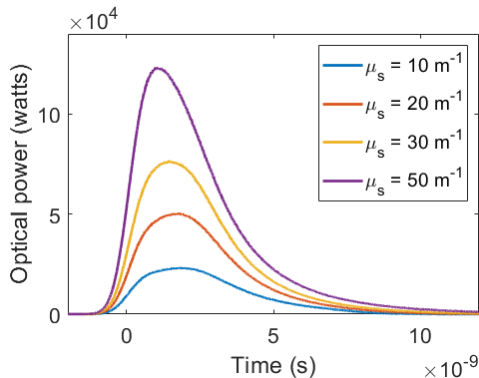


Fig. 6: Retro-dispersión detectada en un medio con  $g = 0.9$  y distintas  $\mu_s$ , para un pulso de luz con energía inicial de 1 mJ (sin obstáculo en el espacio).

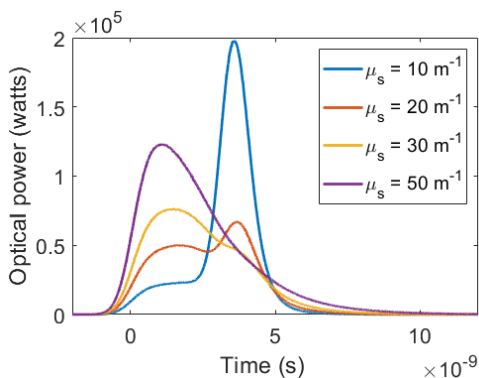


Fig. 7: Retro-dispersión detectada en un medio con  $g = 0.9$  y distintas  $\mu_s$ , para un pulso de luz con energía inicial de 1 mJ, con la presencia de un obstáculo a 0.5 m.

Para el caso del modelo de imagen polarimétrica, se presenta la figura correspondiente al cálculo de la Matriz de *Backscattering* para un determinado medio (Fig. 8). Con esta matriz es posible obtener la matriz  $\mathbf{M}$  que define ese espacio para cada uno de los píxeles de una imagen [13]. A pesar de poder ofrecer una información muy detallada sobre las propiedades del medio, en el caso general nuestro interés será el cálculo del vector de Stokes final, por lo que la matriz de Mueller es un resultado intermedio relevante pero no nuestro objetivo final.

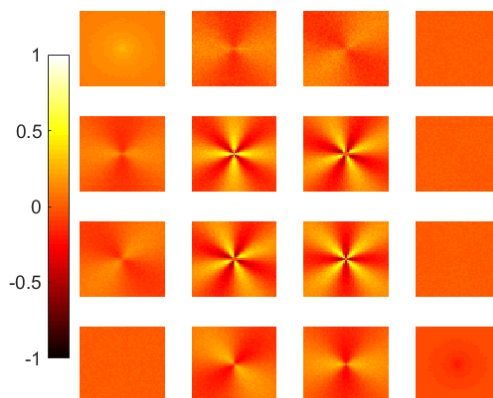


Fig. 8: Simulación de MC de la matriz de Mueller de retro-dispersión en régimen difusivo normalizada para una suspensión de esferas de radio 100 nm e índice de refracción 1.59 en agua.

Por último, la Fig. 9 muestra los resultados observables en el detector para una determinada iluminación con un determinado estado de polarización. Puede apreciarse como aparecen, a causa de los efectos del medio dispersivo, componentes de polarización inexistentes en el estado de iluminación original. La energía correspondiente a cada de esos estados presenta distintos comportamientos. Como ejemplo, se presenta el comportamiento de una fuente con polarización lineal. Obtenemos una señal copolarizada (que se está captando el mismo estado de polarización que la luz incidente), pero también una con polarización cruzada perpendicular a la iluminación inicial.

#### 4.- Conclusión

Se ha presentado un software de simulación basado en el método de Monte Carlo, aplicado a la simulación de diferentes configuraciones de iluminación y observación en medios turbios.

Para ello, se han analizado las casuísticas de propagación en medios turbios basadas en la imagen resuelta en el tiempo y la imagen polarimétrica. Se han presentado casos de uso que validan inicialmente el modelo de propagación de la energía basado en el método de Monte Carlo propuesto contra los modelos teóricos asociados.

Mediante el uso de la resolución temporal somos capaces de separar la luz que ha interactuado con un objeto de la luz retro-dispersada.



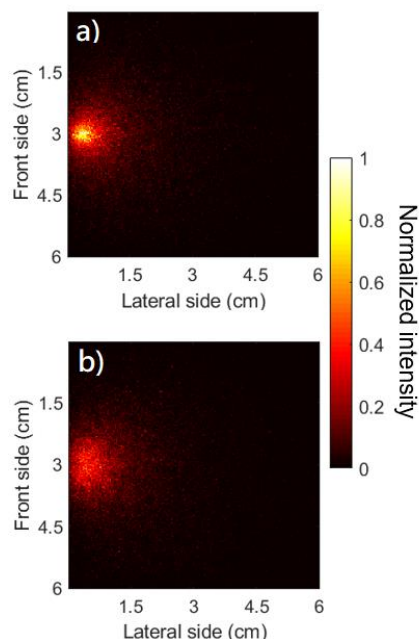


Fig. 9: Imagen de intensidad normalizada en forma de (a) co- y (b) cross-polarización en un tanque de agua de 6x6x6 cm lleno de una solución de esferas de  $0.5 \mu\text{m}$ .

Además, vemos que el punto temporal en donde aparece la luz que ha interactuado con el obstáculo está directamente relacionado con la distancia a la que se encuentra éste. En el caso de la imagen polarimétrica, se demuestra que, a pesar de incidir sobre un medio con luz con una determinada componente de polarización, las propias propiedades dispersivas del medio hacen que aparezcan otras componentes distintas.

En la actualidad, se está validando el modelo de propagación en entornos de imagen polarimétrica, que presenta la complejidad añadida de los posibles estados de polarización en la iluminación y en el analizador de estados. El siguiente objetivo es analizar las posibles configuraciones óptimas que puedan realizarse en los sistemas de imagen: dado el elevado número de variables involucradas (características del medio, de la fuente, del objeto, del sistema óptico...) la realización de simulaciones ha de permitir seleccionar de manera rápida las configuraciones óptimas. Finalmente, se espera aplicar estos nuevos modos de imagen tanto a aplicaciones de transporte en condiciones climatológicas adversas, como a aplicaciones de imagen biomédica en que los medios ópticos tampoco son transparentes.

## Referencias

- [1] R. APPLEBY, R.N.ANDERTON, "Millimeter-wave and submillimeter-wave imaging for security and surveillance", Proc. IEEE, 95, 1683-1690, 2007.
- [2] J.FADE, et al. "Long-range polarimetric imaging through fog", Appl. Optics, 53.18, 3854-3865, 2014.
- [3] G.SATAT et al, "Towards photography through realistic fog", IEEE Int.Conf. on Computational Photography, 1-10, 2018.
- [4] M. LAURENZIS, et al, "New approaches of three-dimensional range-gated imaging in scattering environments", EO Remote Sensing, Photonic Technologies and Applications V, 8186, 2011.
- [5] S. N. PATTANAIK, Sudhir P. MUDUR, "Computation of global illumination by Monte Carlo simulation of the particle model of light", 3rd Eurographics workshop on rendering, 71-83, 1992.
- [6] S. A. PRAHL, et al, "A Monte Carlo model of light propagation in tissue", Dosimetry of laser radiation in medicine and biology, 10305, 1030509, 1989.
- [7] S. L. JACQUES, "Light distributions from point, line and plane source for photochemical reactions and fluorescence in turbid biological tissues", Photochemistry and photobiology, 67(1), 23-32, 1998.
- [8] K. D. RAO, et al, "Time-gated optical imaging through turbid media using stimulated Raman scattering: image contrast", Pramana, 64(2), 229-238, 2005.
- [9] Analytical solution of light diffusion and its potential application for light simulation in DUNE, <https://indico.fnal.gov/event/12273/contribution/0/material/slides/0.pdf>
- [10] C.F. BOHREN, D.R. HUFFMAN, "Absorption and scattering of light by small particles" (John Wiley & Sons, 2008).
- [11] J. C. RAMELLA-ROMAN, et al, "Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media", Optics Express, 13.12, 4420-4438, 2005.
- [12] P. F. MCMANAMON, "Field Guide to Lidar" (SPIE, 2015).
- [13] A.H. HIELSCHER, et al, "Diffuse backscattering Mueller matrices of highly scattering media", Optics Express, 1.13, 441-453, 1997.