



Decodificación de información en sistemas QKD ópticos multidimensionales basada en inteligencia artificial

Zayda Paola Reyes Quijano

Directores
Prof. Yezid Torres
Prof. Leonardo Pachón

Seminario del Ecosistema de Posgrado
Escuela de Física
2020

#LaUISqueQueremos



Universidad
Industrial de
Santander





Índice

1. Introducción
2. Planteamiento del problema
3. Marco teórico
4. Simulaciones



Universidad
Industrial de
Santander

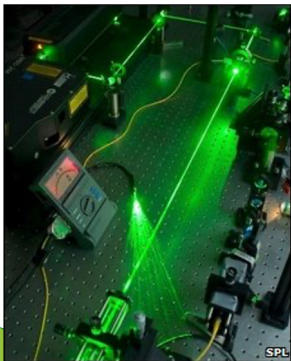


Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co

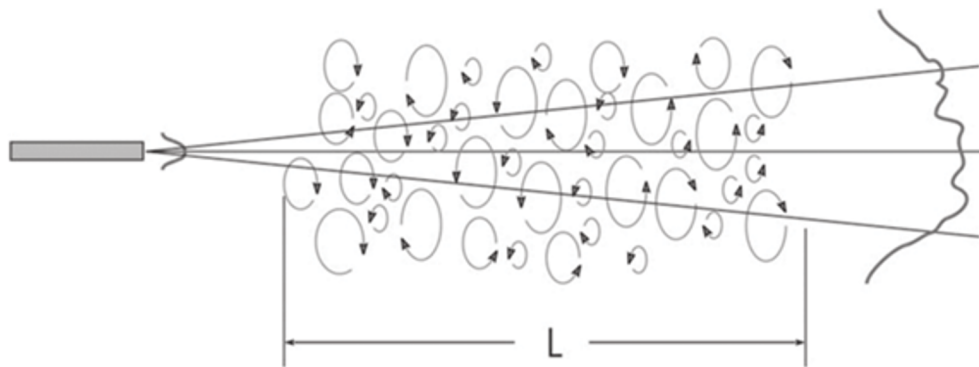


<https://www.utel.edu.mx>



<http://news.bbc.co.uk/2/hi/8243503.stm>

Introducción



Simulating atmospheric turbulence using a phase-only spatial light modulator. S. Afr. j. sci. vol.104 n.3-4 Pretoria Mar./Apr. 2008



Ground-based synchronous optical instrument for measuring atmospheric visibility and turbulence intensity: theory, design and experiments. Optics Express Vol. 26, Issue 6, pp. 6833-6850 (2018)



Universidad Industrial de Santander

el mejor escenario de creación e innovación.

www.uis.edu.co

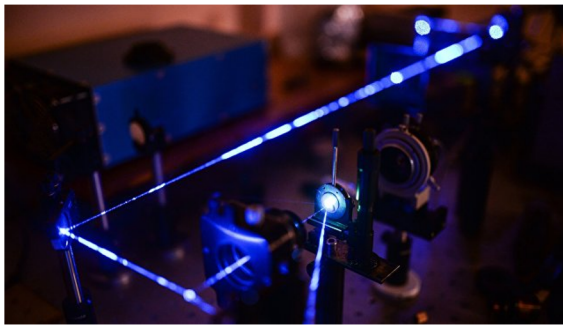




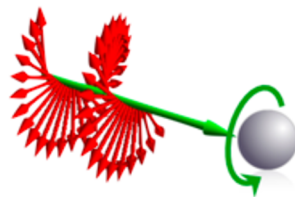
Planteamiento del problema



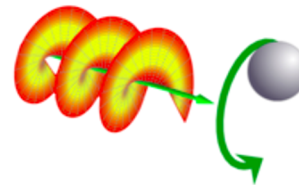
Universidad Industrial de Santander



<https://chelorg.com/2017/01/16/>

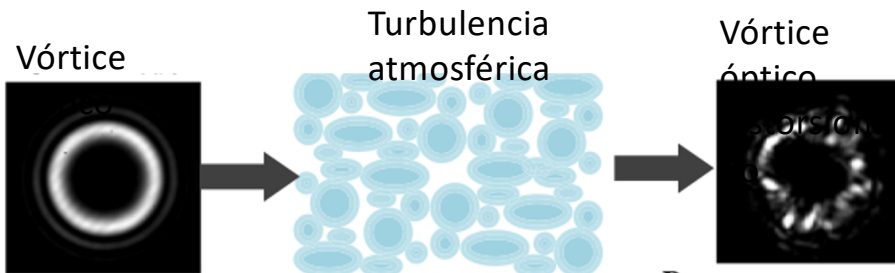
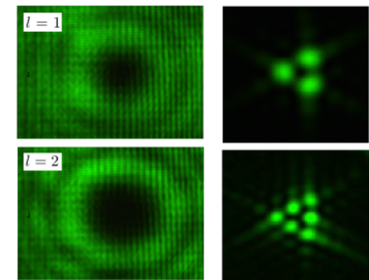


SAM interaction

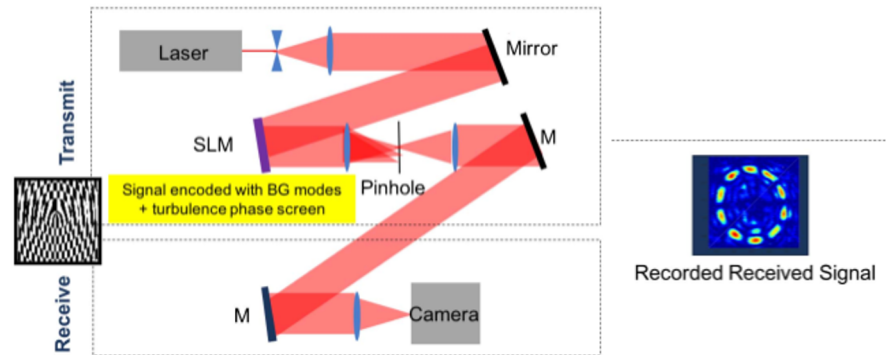


OAM interaction

https://en.wikipedia.org/wiki/Angular_momentum_of_light



Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing. Opt. Lett., 38(20):40624065, Oct 2013.



Somos **el mejor** escenario de creación e innovación.

Machine learning approach to oam beam demultiplexing via convolutional neural networks. Appl. Opt., 56(12):33863396, Apr 2017.

www.uis.edu.co





Marco teórico



Universidad Industrial de Santander

Momento angular orbital de la luz

Los haces con momento angular orbital se caracterizan por tener un frente de onda helicoidal. Estos haces se describen con un término de fase acimutal $e^{il\phi}$ [1].

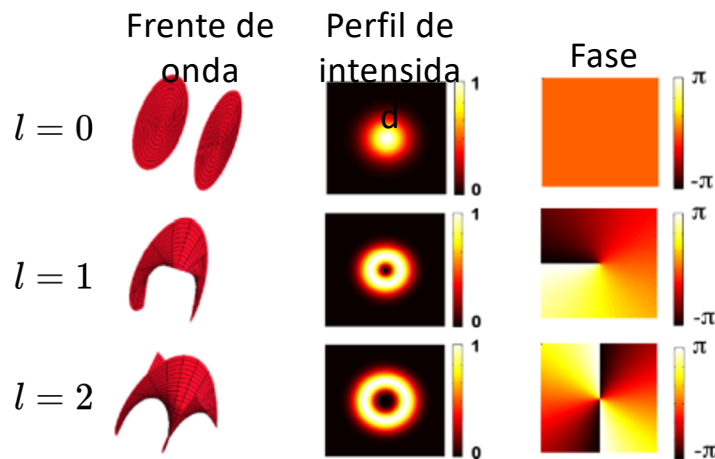


Figura 1. Frente de onda, perfil de intensidad y fase para diferentes valores de carga topológica. Fuente: Ref.[2]

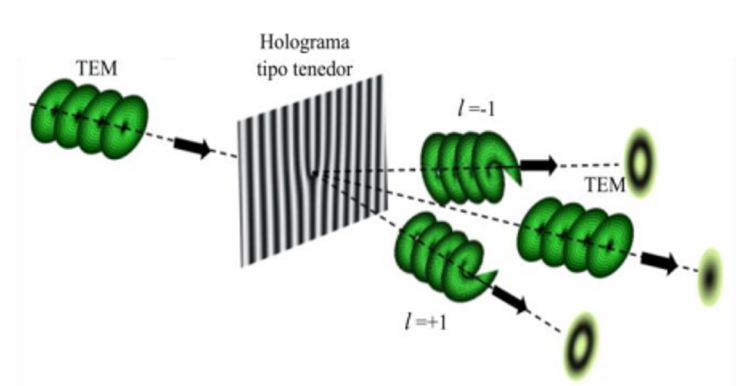


Figura 2. Esquema de la generación de un haz MAO utilizando un holograma tipo tenedor.

Somos **el mejor** escenario de creación e innovación.

[1] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman. Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes. Rev. A, 45:81858189, 06.1992. www.ijop.uva.edu.co
[2] A. E. Willner, et.al Design challenges and guidelines for free space optical communication links using orbital angular momentum multiplexing of multiple beams. Journal of Optics, 18(7):074014, 2016.



Marco teórico



Universidad Industrial de Santander

Turbulencia artificial.

Experimentalmente es posible utilizar un modulador espacial de luz sobre el cual se proyectan máscaras de fase aleatorias, éstas pueden simularse mediante [6,7]

$$\Phi(X, Y) = \Re \{ \mathcal{F}^{-1} (\mathbb{C}_{NN} \sqrt{\Phi_{NN}(\kappa)}) \}$$

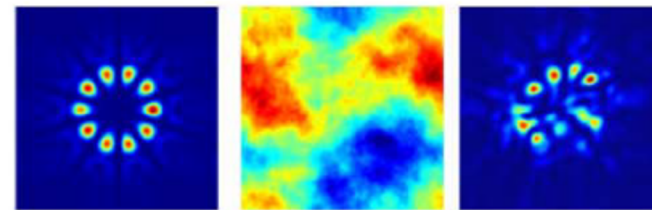


Figura 3. Simulación del efecto de la turbulencia atmosférica. Patrón de intensidad para la superposición $l = \pm 5$ (izquierda), máscara de turbulencia (centro), patrón distorsionado(derecha) luego de propagarse. Fuente: Ref. [6]

X, Y coordenadas cartesianas

\Re parte real de la función

\mathcal{F}^{-1} transformación rápida de Fourier inversa,

\mathbb{C}_{NN} números complejos aleatorios normales con media cero y varianza unitaria distribuidos sobre una cuadrícula de muestreo de tamaño $N \times N$

$$\Phi_{NN}(\kappa) = 0.023 r_0^{-5/3} (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6} \exp(-\kappa^2 / \kappa_m^2) \quad , \text{ con el parámetro de Fried } r_0 = (0.423 k^2 C_n^2 Z)^{-3/5}$$

Somos **el mejor** escenario de creación e innovación.

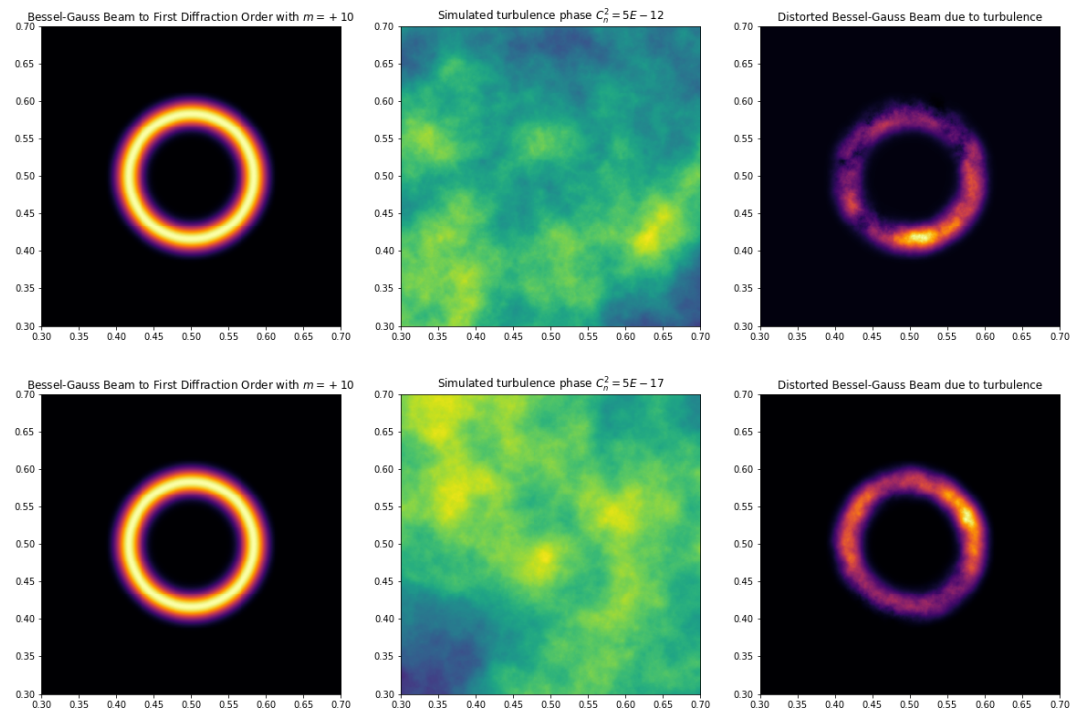
www.uis.edu.co

[6] S. Lohani and R. T. Glasser. Turbulence correction with artificial neural networks. Opt. Lett. , 43(11):26112614, Jun 2018.

[7] R. G. Lane, A. Glindemann, and J. C. Dainty. International Simulation of a kolmogorov phase screen. Waves in Random Media , 2(3):209224, 1992.

Simulaciones

Resultados preliminares



Universidad
Industrial de
Santander

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co



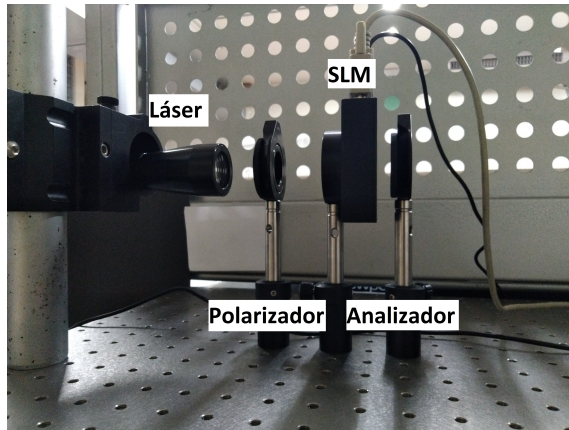
Simulaciones



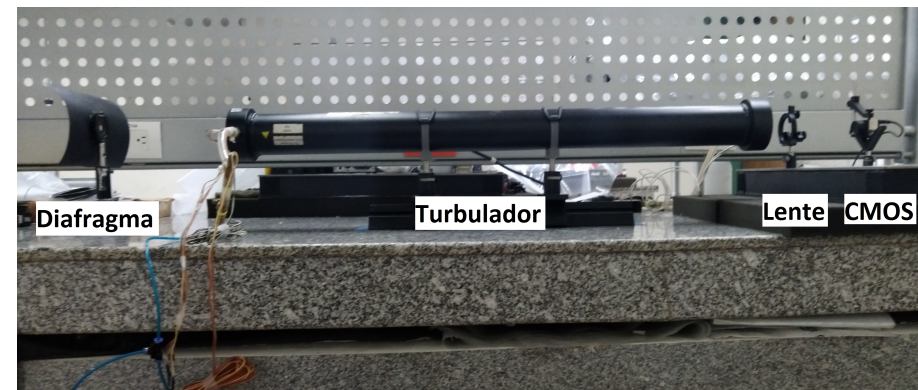
Universidad
Industrial de
Santander

Propagación de un haz con momento angular orbital a través de un medio turbulento

Experimental



(a)



(b)

Figura 5. Montaje experimental . (a) Generación. (b) Detección.



Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co

Simulaciones

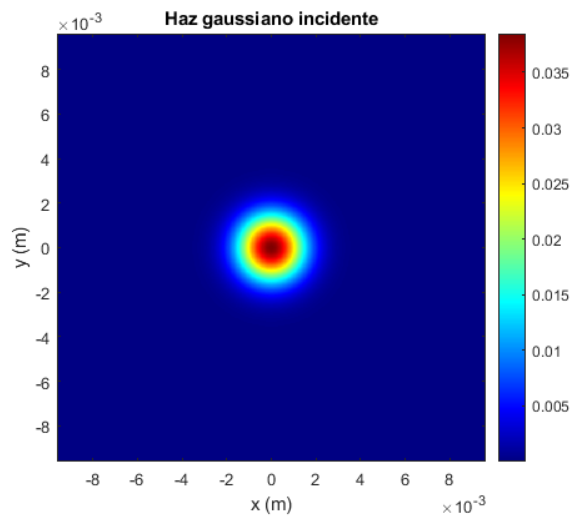


Universidad Industrial de Santander

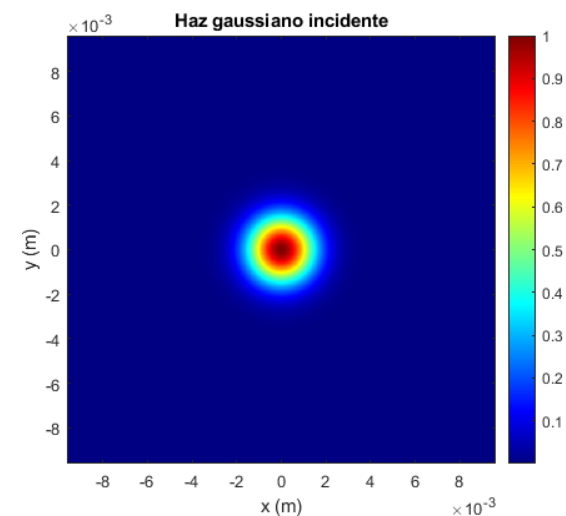
Haz Gaussiano

```
%Simulation parameters  
L1=(600*(32E-6)); %side length  
M=600; %number of samples  
N=M;  
dx1=L1/M; %src sample interval
```

```
lambda=5.43E-7; %wavelength  
k=2*pi/lambda; %wavenumber  
z=1; %propagation dist (m)  
wo=(0.83E-3)/2; % Beamwaist
```



(a)



(b)

Figura 6. Haz Gaussiano. (a) No normalizado. (b) Normalizado.

Somos **el mejor** escenario de creación e innovación.

www.uis.edu.co



Holograma

Simulaciones



Universidad
Industrial de
Santander

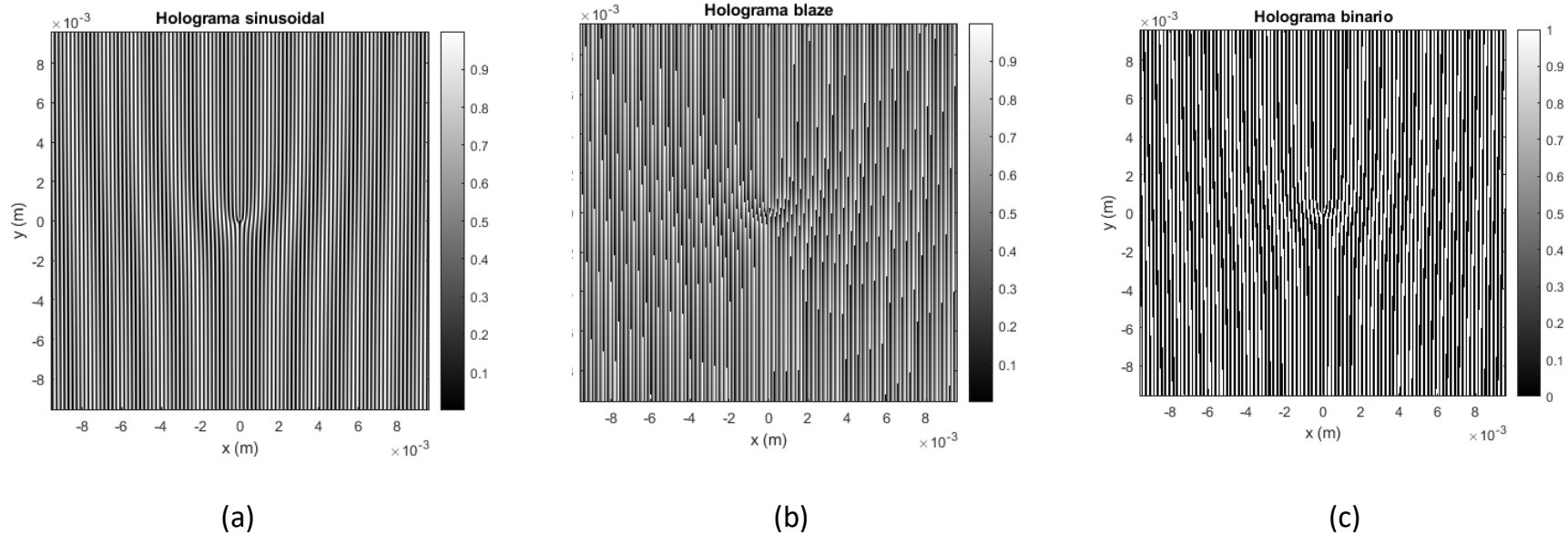


Figura 7. Holograma para generar un vórtice con $m=+2$ que se propaga por el espacio libre (a) sinusoidal, (b) blazed, y (c) binario.

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co





Holograma

Simulaciones



Universidad
Industrial de
Santander

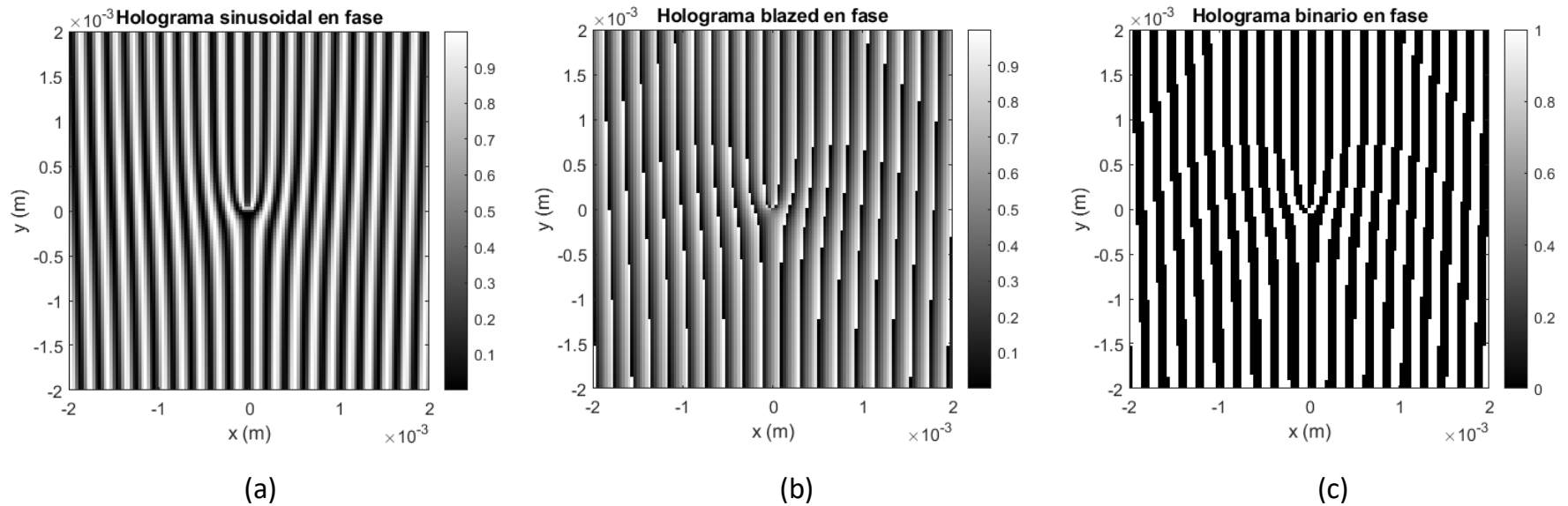


Figura 8. Holograma para generar un vórtice con $m=+2$ que se propaga por el espacio libre (a) sinusoidal, (b) blazed, y (c) binario.

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co



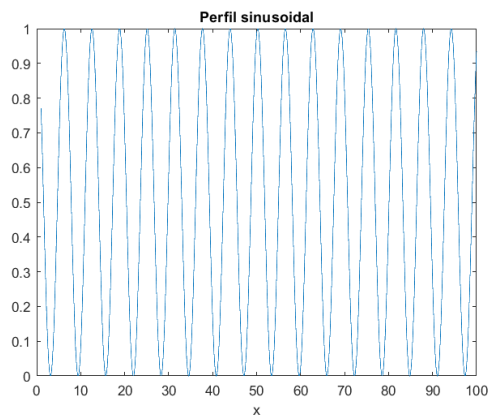


Holograma

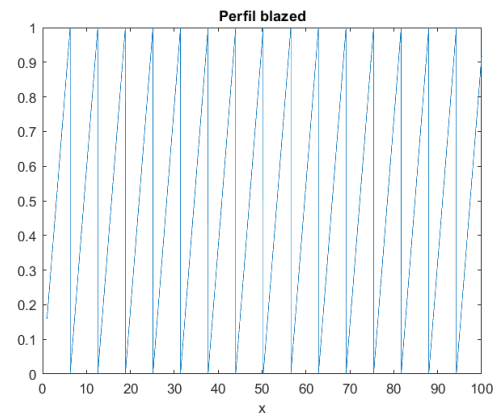
Simulaciones



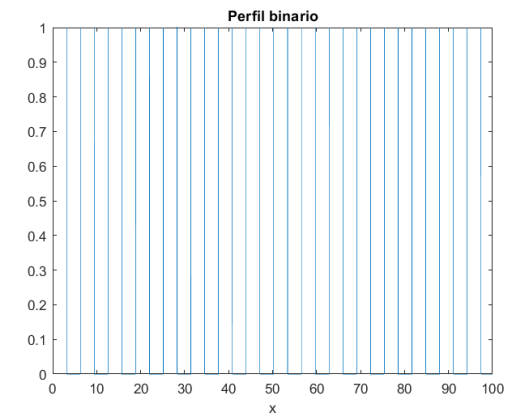
Universidad
Industrial de
Santander



(a)



(b)



(c)

Figura 9. Perfil del Holograma para generar un vórtice con $m=+2$ que se propaga por el espacio libre (a) sinusoidal, (b) blazed, y (c) binario.

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co



Simulaciones



Universidad Industrial de Santander



Difracción de Fraunhofer

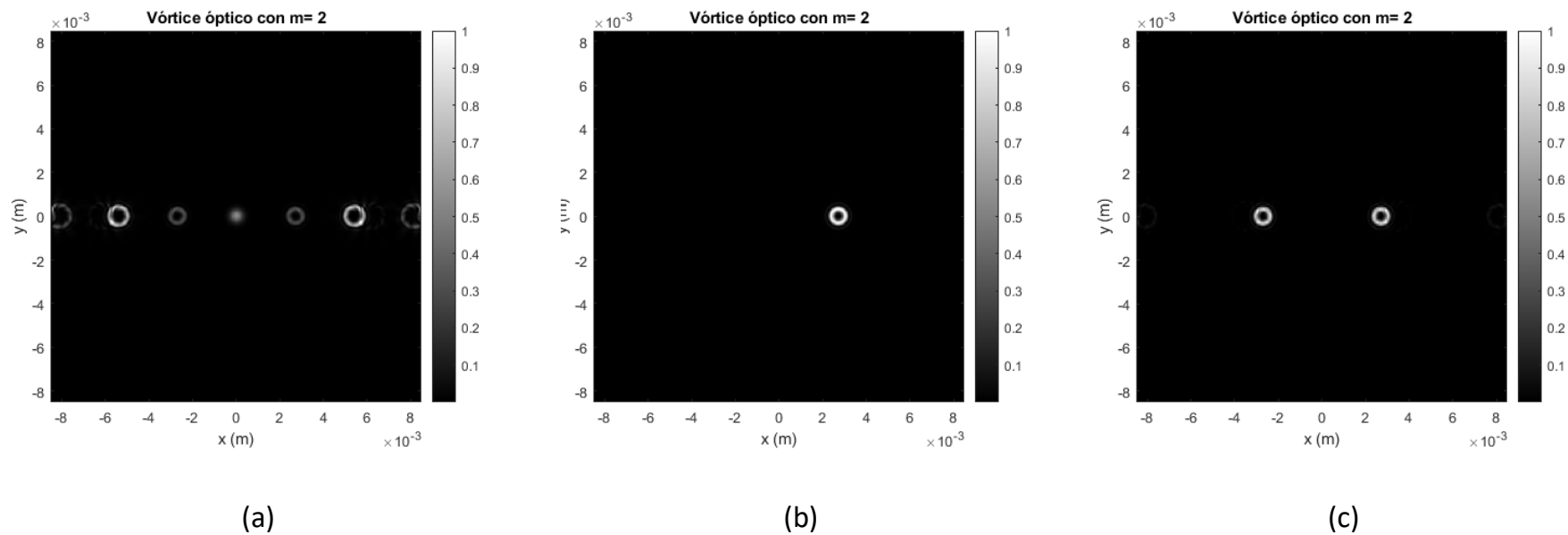


Figura 10. Difracción de Fraunhofer de un vórtice con $m=+2$ que se propaga por el espacio libre $z=1$ [m] (a) sinusoidal, (b) blazed, y (c) binario.

Somos **el mejor** escenario de creación e innovación.

www.uis.edu.co





Simulaciones



Universidad
Industrial de
Santander

Generación experimental de haces con momento angular orbital

Se utilizan un polarizador (P), un analizador (A), un diafragma (D) para seleccionar el primer orden de difracción, y una cámara CMOS para capturar las imágenes en intensidad de los vórtices ópticos.

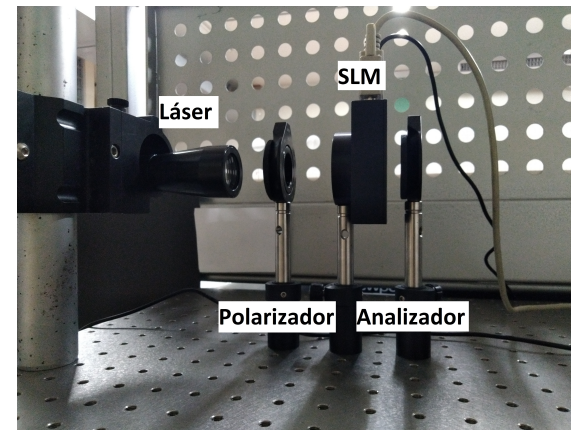
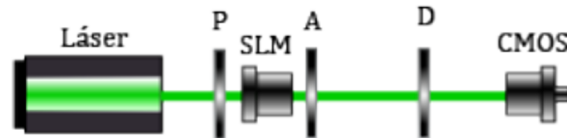


Figura 11. Esquema del montaje experimental para la generación de haces con momento angular orbital.



Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co

Simulaciones



Universidad
Industrial de
Santander

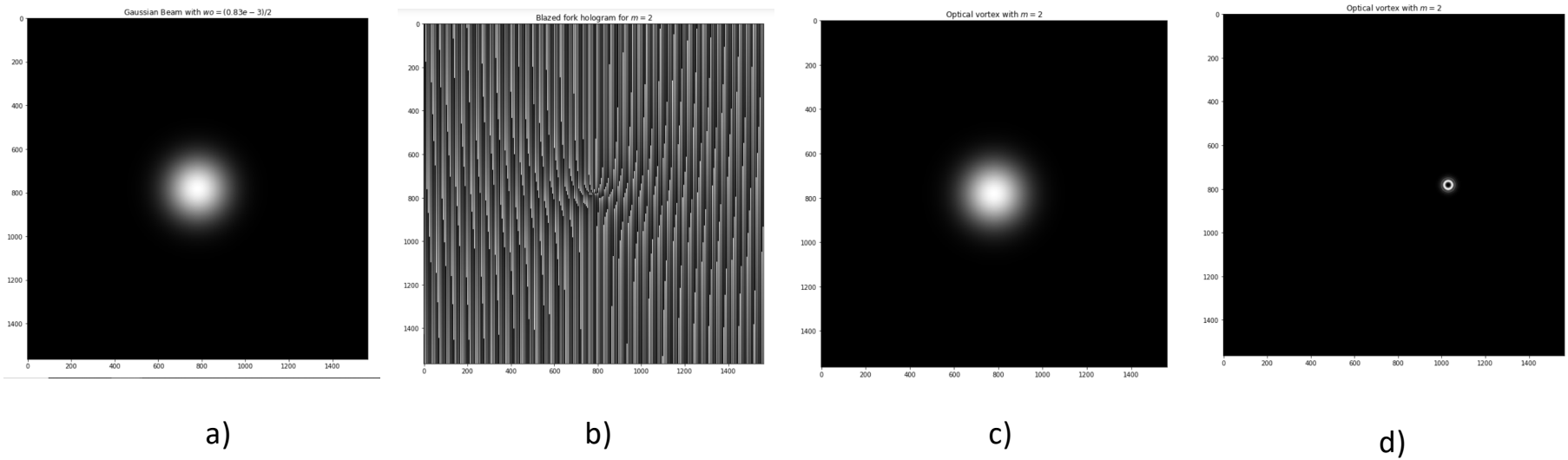


Figura 12. Generación de un vórtice óptico con $m=2$. Simulación. a) Haz gaussiano, b) Holograma tipo tenedor, c) Haz gaussiano*Holograma tenedor y d) Vórtice óptico propagado a 2 metros.

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co

Simulaciones



Universidad
Industrial de
Santander

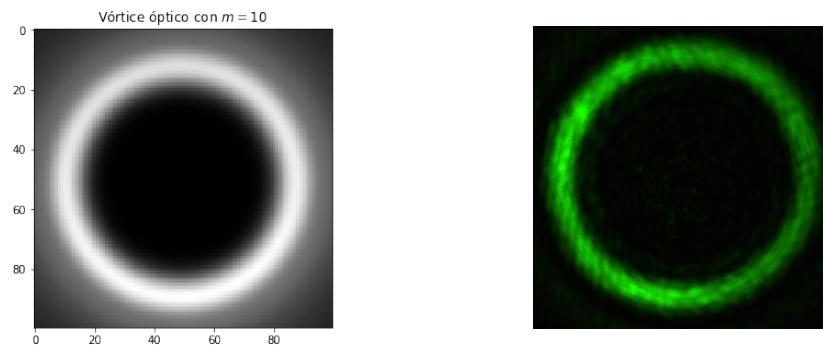


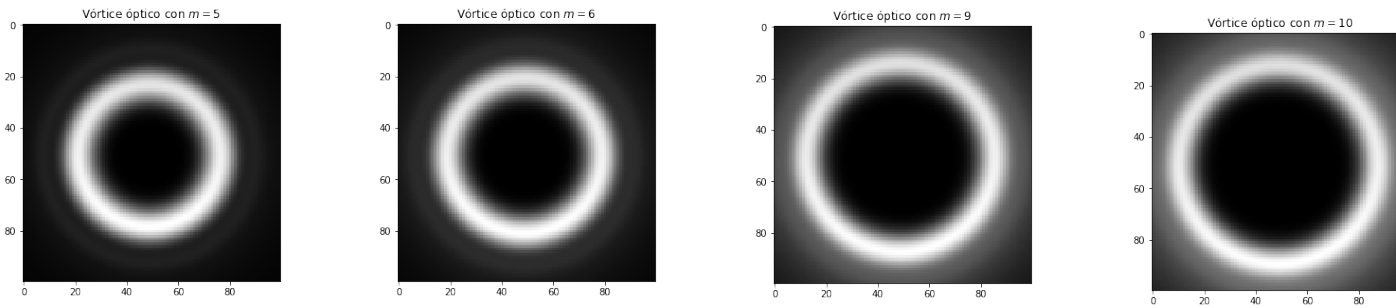
Figura 13. Vórtices ópticos obtenido numérica y experimentalmente.

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co

Simulaciones

Generación de haces con momento angular orbital Numérica



Experimental

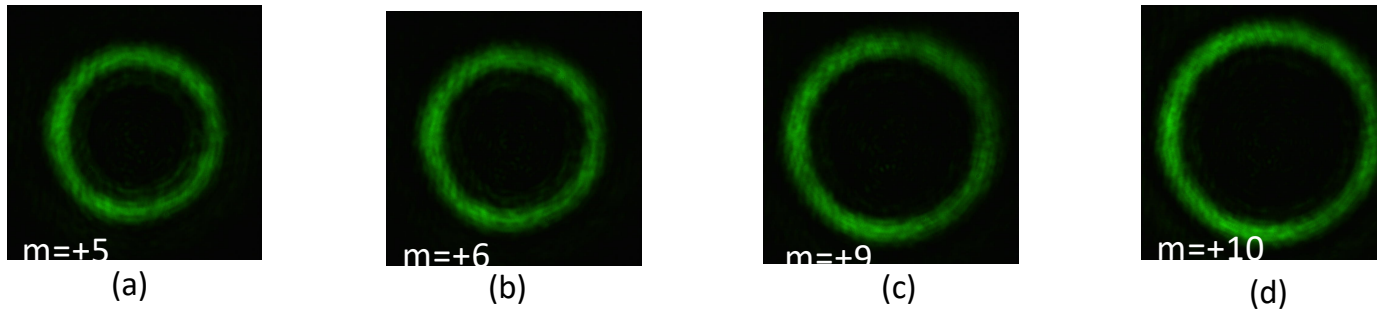


Figura 14. Imagen en intensidad de un haz OAM. (a) $m=+5$, (b) $m=+6$, (c) $m=+9$ y (d) $m=+10$. Experimental propagado a través de un medio turbulento.



Universidad
Industrial de
Santander

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

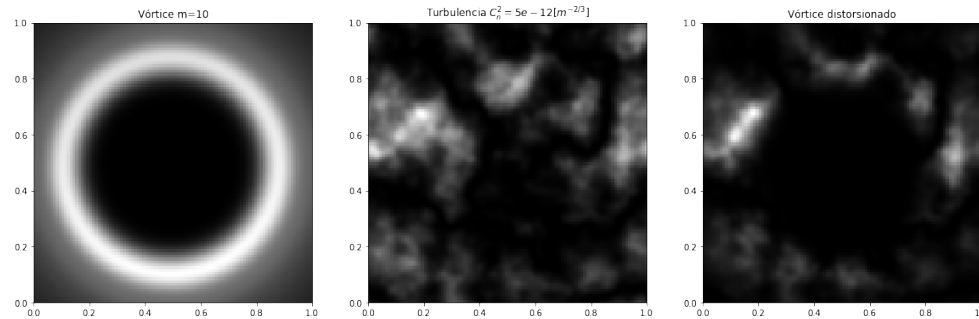
www.uis.edu.co

Simulaciones



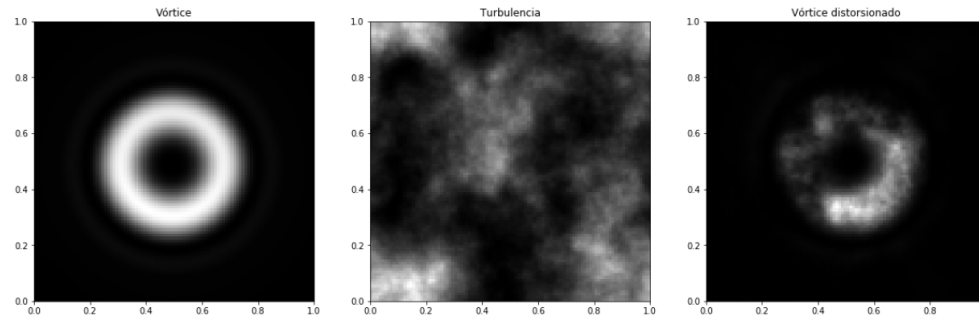
Universidad Industrial de Santander

$m = 10$



$$c_n^2 = 5 \times 10^{-12} [m^{-\frac{2}{3}}]$$

$m = 2$



$$c_n^2 = 5 \times 10^{-17} [m^{-\frac{2}{3}}]$$

Figura 15. Vórtice óptico que se propaga por un medio turbulento (a) vórtice óptico, (b) máscara de turbulencia, y (c) vórtice óptico distorsionado debido a la turbulencia.

Somos **el mejor** escenario de creación e innovación.

www.uis.edu.co

Bibliografía

- [1] L. Allen, M. W Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman. Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes. *Rev. A* , 45:81858189, 06 1992.
- [2] A. E. Willner, et.al Design challenges and guidelines for free space optical communication links using orbital angular momentum multiplexing of multiple beams. *Journal of Optics* , 18(7):074014, 2016.
- [3] A. N. Kolmogorov. The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds' Numbers. 30:301305, 1941.
- [4] A.N. Kolmogorov. Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* , 434(1890):1517, 1991.
- [5] J. M. Jassim, R. Ali, K.M Jasim, and M. K. Jawad. Experimental study of clear atmospheric turbulence effects on laser beam spreading in free space. *Journal of Applied Engineering Research* , 12:1478914796, 12 2017
- [6] S. Lohani and R. T. Glasser. Turbulence correction with artificial neural networks. *Opt. Lett.* , 43(11):26112614, Jun 2018.
- [7] R. G. Lane, A. Glindemann, and J. C. Dainty. International Simulation of a kolmogorov phase screen. *Waves in Random Media* , 2(3):209224, 1992.
- [8] W. T. Rhodes, A.f Boughanmi, and Y. Torres. High-security communication by coherence modulation at the photon-counting level. *Appl. Opt.* , 55(15):39523957, May 2016.
- [9] P. A. López, Y. Torres, and W. T. Rhodes. High-dimensional quantum key distribution by coherence modulation and orbital angular momentum at the photon-counting level. *Proc. SPIE* , 10674, May 2018.



Universidad
Industrial de
Santander

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co

Bibliografía



Universidad
Industrial de
Santander

- [10] T. Doster and A. T. Watnik. Machine learning approach to oam beam demultiplexing via convolutional neural networks. *Appl. Opt.* , 56(12):33863396, Apr 2017.
- [11] A. Krizhevsky and I. Sutskever G. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *advances in neural information processing systems 25 (NIPS 2012)*, 2017.
- [12] K. Simonyan and A. Zisserman. image recognition. *Very deep convolutional networks for large scale CoRR* , arXiv 1409.1556, 2014.
- [13] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioe, J. Shlens, and Z. Wojna. Rethinking the inception architecture for computer vision. *CoRR* , arXiv 1512.00567, 2015.
- [14] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger. Convolutional networks. In *CVPR* , volume 1, page 3, 2017.
- [52] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, and Y. Bengio. *Deep learning* , volume 1. MIT press Cambridge, 2016.

Imaging through ground-level turbulence by Fourier Telescopy: Simulations and preliminar experiments.
Nishantha Randunu Pathirannehelage. The College of Engineering and Computer Science. PhD Thesis 2015

Somos **el mejor** escenario
de creación e innovación.

www.uis.edu.co



Universidad
Industrial de
Santander

#LaUISqueQueremos

¡Gracias!

