Generación de supercontinuo ultra amplio embebido a partir de un láser de fibra aleatorio.

Generation of an ultra-broadband embedded supercontinuum from a random fiber laser.

Manuel Durán Sánchez* (1).
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).
manueld@inaoep.mx.

Edwin Addiel Espinosa de la Cruz (2). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),
edwin_addiel@inaoep.mx.

Ulises Alcántara-Bautista (3). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),
ulisesab@inaoep.mx.

Baldemar Ibarra-Escamilla (4). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),
baldemar@inaoep.mx.

*correspondig author.

Artículo recibido en septiembre 02, 2026; aceptado en octubre 01, 2026.
Conferencia presentada en el Segundo Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica 2023.

Resumen.

Se presenta una fuente que genera supercontinuo (SC) ultraamplio directamente dentro de la cavidad de un láser de fibra dopada con iterbio en configuración de figura 9 (F9). La arquitectura emplea un espejo de lazo amplificador no lineal (NALM) con una reflectividad deliberadamente baja, de manera que la retrodispersión de Rayleigh en la fibra SM-2000 dentro del NALM participa en la realimentación de la cavidad. Esta realimentación, junto con la ganancia proporcionada por la fibra dopada, permite alcanzar el umbral de dispersión Brillouin estimulada (SBS), dando lugar a pulsos aleatorios de autoconmutación Q con duraciones del orden de nanosegundos y potencias pico del orden de kilowatts. Estos pulsos desencadenan el ensanchamiento espectral intracavidad al propagarse por el tramo de fibra SM-2000. Con 3 W de potencia de bombeo se obtuvo una emisión que se extiende desde la región roja del visible hasta más allá de 2100 nm; al excluir el pico principal, el espectro supera una octava, aproximadamente de 856 a 2141 nm a –20 dB, y presenta una planitud espectral mejor que 5 dB entre 1256 y 2141 nm. El enfoque integra en una misma cavidad la generación de pulsos aleatorios con conmutación Q de alta potencia pico y el ensanchamiento espectral ultraamplio, ofreciendo una alternativa simple, compacta y de bajo costo para la generación de fuentes de banda ancha con aplicaciones en espectroscopía, microscopía e imagen biomédica.

Palabras clave: Autoconmutación Q, dispersión Brillouin estimulada, láser aleatorio de fibra, óptica no lineal, retrodispersión de Rayleigh, supercontinuo.

Abstract.

An ultra-broad supercontinuum (SC) source generated directly inside the cavity of a figure-9 (F9) ytterbium-doped fiber laser is presented. The architecture employs a nonlinear amplifying loop mirror (NALM) with deliberately low reflectivity, allowing Rayleigh backscattering in the SM-2000 fiber within the NALM to contribute to the cavity feedback. This feedback, together with the gain provided by the doped fiber, enables the stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold to be reached, giving rise to random self-Q-switched pulses with nanosecond-scale durations and kilowatt-level peak powers. These pulses trigger intracavity spectral broadening as they propagate through the SM-2000 fiber segment. At a pump power of 3 W, an emission extending from the red region of the visible spectrum to beyond 2100 nm was obtained; excluding the main peak, the spectrum spans more than one octave, approximately from 856 to 2141 nm at −20 dB, and exhibits a spectral flatness better than 5 dB between 1256 and 2141 nm. The approach integrates, within the same cavity, the generation of high-peak-power random Q-switched pulses and ultra-broad spectral broadening, providing a simple, compact, and low-cost alternative for broadband light-source generation with applications in spectroscopy, microscopy, and biomedical imaging.

Keywords: Nonlinear optics, random fiber laser, rayleigh backscattering, self-Q-switching, stimulated brillouin scattering, supercontinuum.

1. Descripción de la conferencia.

La generación de supercontinuo (SC) consiste en el ensanchamiento espectral de una emisión inicialmente estrecha mediante la interacción entre la dispersión y los efectos no lineales. En fibras ópticas, este proceso puede involucrar automodulación de fase, modulación de fase cruzada, mezcla de cuatro ondas, esparcimiento Raman estimulado, inestabilidad de modulación, dinámica de solitones, desplazamiento de autofrecuencia y generación de ondas dispersivas (Agrawal, 2011; Dudley et al., 2006; Skryabin & Gorbach, 2010). La combinación de estos mecanismos permite desarrollar fuentes de luz de amplio ancho espectral, capaces de extenderse desde el visible hasta el infrarrojo, con aplicaciones en espectroscopía, microscopía, sensado y aplicaciones biomédicas (Kaminski et al., 2008; Poudel & Kaminski, 2019; Tu & Boppart, 2013).

Los esquemas convencionales para generar SC suelen emplear una fuente láser externa, ya sea pulsada o de onda continua de alta potencia, seguida de una fibra no lineal, como una fibra de cristal fotónico o una fibra altamente no lineal. Aunque estas configuraciones ofrecen gran flexibilidad, su implementación puede ser compleja. Una alternativa consiste en generar el ensanchamiento espectral dentro de la propia cavidad láser, lo que se conoce como generación intracavitaria de SC. De esta manera, la señal que inicia el SC y el medio no lineal responsable de su ensanchamiento espectral forman parte de un mismo sistema, lo que permite obtener configuraciones más compactas y simples (Alcántara-Bautista et al., 2024; Espinosa-de-la Cruz et al., 2023; He et al., 2022). Esta es precisamente la estrategia adoptada en el trabajo que se presenta en este artículo de divulgación.

Como antecedente, nuestro grupo demostró previamente una fuente de SC intracavitario basada en un láser de fibra Er/Yb con autoconmutación Q, en la que una sección larga de fibra SM-2000, implementada dentro de la cavidad como medio no lineal, permitió generar un espectro con una anchura de aproximadamente 560 nm a –5 dB, comprendido entre 1600 y 2160 nm. Este resultado mostró que los pulsos generados dentro de la propia cavidad podían proporcionar las altas potencias pico necesarias para producir un ensanchamiento espectral considerable sin recurrir a una fuente pulsada externa (Espinosa-de-la Cruz et al., 2023).

A partir de este antecedente, se implementó una nueva variante de la configuración de figura 9 (F9), en esta ocasión empleando fibra dopada con Yb como medio de ganancia. El espejo de lazo amplificador no lineal (NALM) utiliza un acoplador altamente asimétrico 99:01, cuya baja reflectividad permite que la retrodispersión distribuida de Rayleigh en la fibra SM-2000 participe activamente en la realimentación de la cavidad. Esta arquitectura favorece la generación de pulsos de alta potencia pico, capaces de producir un amplio ensanchamiento espectral dentro de la propia cavidad (Alcántara-Bautista et al., 2024).

Con esta configuración se obtuvo, a una potencia de bombeo máxima de 3 W, un SC ultraamplio que se extiende desde la región roja del visible hasta más allá de 2100 nm, con un ensanchamiento superior a una octava y una amplia región de alta planitud espectral (Alcántara-Bautista et al., 2024). En este artículo de divulgación se presenta esta configuración y se describen los mecanismos físicos que permiten integrar, dentro de una misma cavidad totalmente de fibra, la generación de la señal láser, la formación de pulsos y su posterior ensanchamiento espectral.

2. Métodos.

Arquitectura experimental del sistema SC.

La fuente emplea una cavidad en configuración F9, completamente en fibra, formada por un espejo de lazo de fibra (FLM), construido con un acoplador 50:50, y un NALM, basado en un acoplador altamente asimétrico 99:01, tal como se muestra en la figura 1. El NALM contiene un tramo de 2.2 m de fibra de doble revestimiento dopada con iterbio (YDCF), bombeada con una fuente a 976 nm mediante un combinador de bombeo de (2+1) x 1. Además, incorpora un controlador de polarización (PC) y 145 m de fibra SM-2000 torcida, dando una longitud total de cavidad cercana a 150.5 m. La YDCF proporciona la ganancia para la señal láser que inicia el SC, mientras que la fibra SM-2000 actúa como medio no lineal para el ensanchamiento espectral (Alcántara-Bautista et al., 2024).

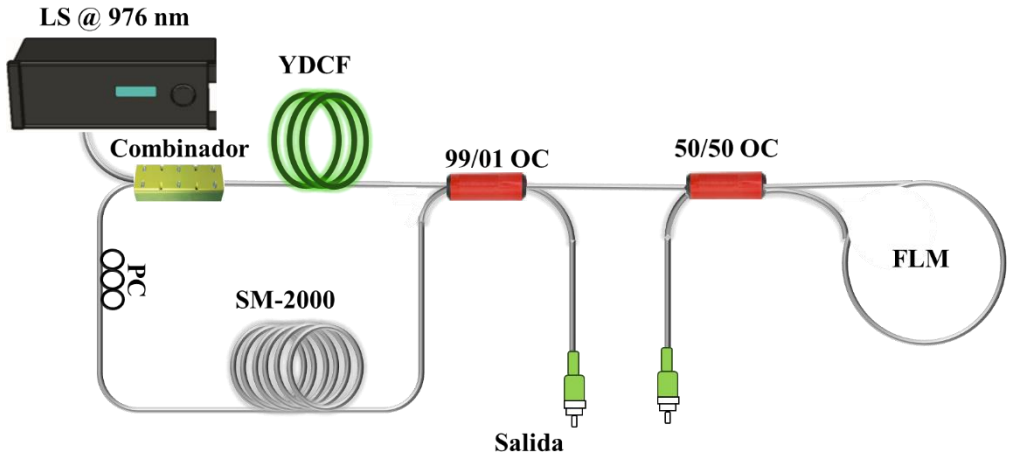


Figura 1. Esquema experimental del láser de fibra en configuración F9 empleado para la generación intracavitaria de SC. YDCF: fibra de doble revestimiento dopada con iterbio; PC: controlador de polarización; OC: acoplador óptico; FLM: espejo de lazo de fibra; LS: fuente láser. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024) © 2023 Elsevier Ltd.

Control de reflectividad y formación del régimen aleatorio.

Para un NALM ideal, la reflectividad puede escribirse de forma aproximada como en la ecuación (1):

$$\boldsymbol{R = 2\alpha(1-\alpha)[1+\cos(\Delta\varphi_L + \Delta\varphi_{NL})]} \quad (1)$$

donde α es la razón de acoplamiento, $\boldsymbol{\Delta\varphi_L}$ representa el desfase lineal asociado a la birrefringencia de la fibra y al ajuste del PC, y $\boldsymbol{\Delta\varphi_{NL}}$ corresponde al desfase no lineal acumulado entre las ondas contrapropagantes. Para α = 0.99, la reflectividad máxima ideal es cercana al 4%. Mediante el ajuste del PC, esta reflectividad puede reducirse aún más, permitiendo que la retrodispersión de Rayleigh en la fibra SM-2000 contribuya de manera significativa a la realimentación de la cavidad. Esta realimentación distribuida, en conjunto con la ganancia de la YDCF, permite alcanzar el umbral de SBS y generar pulsos de oscilación de relajación asociados a la emisión con autoconmutación Q de escala nanosegundos (Alcántara-Bautista et al., 2024).

Caracterización del sistema SC.

Debido a la gran extensión espectral del SC, su caracterización se realizó mediante dos analizadores de espectro óptico: uno para el intervalo de 600 a 1200 nm y otro para el intervalo de 1200 a 2400 nm. Antes del puerto de entrada del segundo analizador se colocó un filtro de paso largo con una longitud de onda de corte de 1200 nm, con el propósito de evitar perturbaciones en la medición cuando la radiación con longitudes de onda inferiores a 1200 nm entra directamente en su sistema de detección. La señal temporal se registró mediante un fotodetector rápido de 12.5 GHz junto con un osciloscopio de 2.5 GHz. Además, los espectros de radiofrecuencia permitieron corroborar la operación pulsada y la frecuencia de repetición, así como observar la estructura de batimiento asociada con los modos longitudinales de la cavidad (Alcántara-Bautista et al., 2024).

3. Desarrollo.

Evolución espectral del SC.

El umbral del régimen de autoconmutación Q (SQS) se encuentra alrededor de 1.4 W. Al incrementar la potencia de bombeo, el espectro, iniciado por una señal semilla cercana a 1052 nm asociada con la banda de emisión del Yb, aumenta en intensidad y el espectro se ensancha progresivamente. A partir de 2.1 W, se obtiene un SC amplio, que se extiende desde alrededor de 800 nm hasta más allá de 2100 nm. Al aumentar la potencia hasta 3 W, el espectro alcanza la región roja del visible y se extiende hasta longitudes de onda superiores a 2100 nm, como se muestra en la figura 2(a). Para esta potencia máxima de bombeo, el espectro presenta una planitud espectral mejor que 5 dB entre 1256 y 2141 nm. Además, al excluir el pico principal, el espectro se extiende aproximadamente de 856 a 2141 nm a –20 dB, cubriendo más de una octava, como se observa en la figura 2(b) (Alcántara-Bautista et al., 2024).

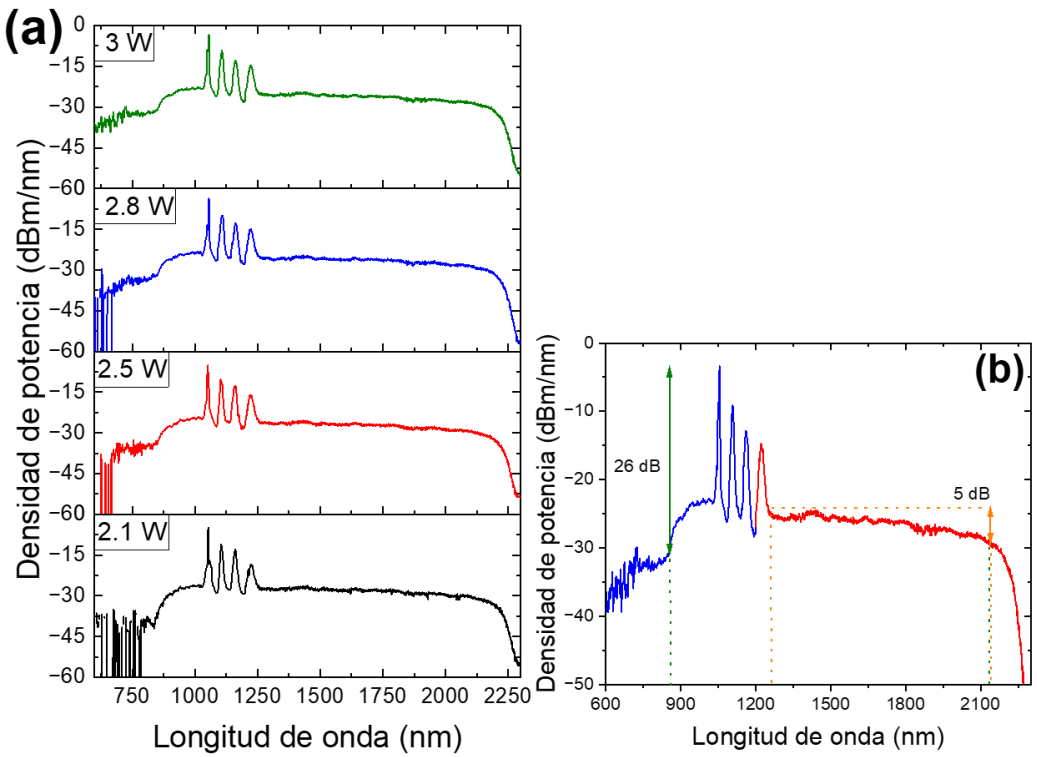


Figura 2. (a) Evolución del espectro óptico con la potencia de bombeo y (b) espectro del SC obtenido a la máxima potencia de bombeo de 3 W. Para cubrir el intervalo espectral completo, las mediciones se realizaron empleando dos OSA. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024).

Los primeros tres picos Stokes Raman, desplazados hacia longitudes de onda mayores respecto de la señal semilla de aproximadamente 1052 nm, se originan por dispersión Raman estimulada. El cuarto pico Stokes Raman, localizado cerca de la región de dispersión cero de la fibra, actúa como señal que induce la extensión del espectro hacia la región de dispersión anómala mediante inestabilidad de modulación. Los solitones generados por este proceso experimentan posteriormente efectos como el desplazamiento de autofrecuencia y colisiones entre solitones durante su propagación por la fibra SM-2000, contribuyendo a la formación de una región espectral amplia y relativamente plana a longitudes de onda mayores. Por otra parte, la extensión hacia el visible puede atribuirse a procesos de mezcla de cuatro ondas entre la señal cercana a 1052 nm y los componentes Raman, así como a la generación de ondas dispersivas (Agrawal, 2011; Alcántara-Bautista et al., 2024).

Extensión hacia el visible.

Una característica destacable del sistema es que el ensanchamiento espectral no permanece confinado al infrarrojo. Las mediciones realizadas con un espectrómetro visible-infrarrojo cercano confirman la presencia de componentes en la región visible, extendiéndose hasta longitudes de onda cercanas a 600 nm. La componente roja del espectro SC puede incluso observarse directamente al proyectar la salida del láser sobre una pantalla blanca, como se muestra en la figura 3. Esta observación proporciona una evidencia visual directa de la ampliación del SC hacia la región visible (Alcántara-Bautista et al., 2024).

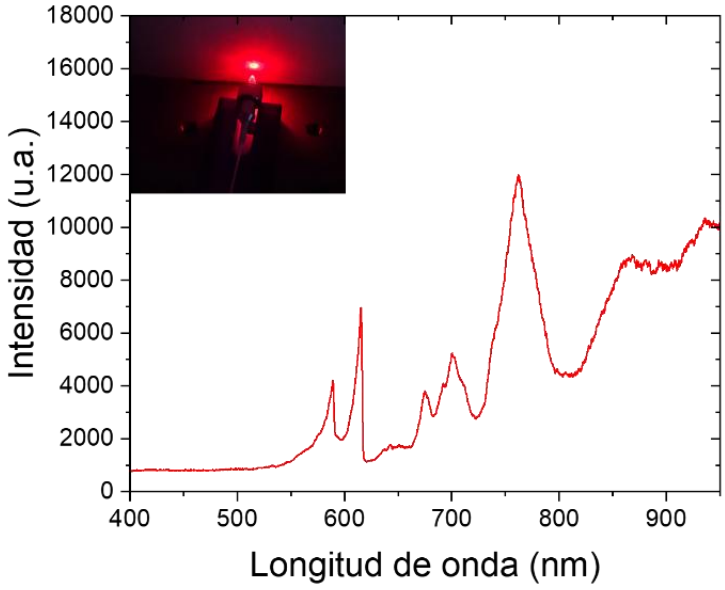


Figura 3. Espectro registrado en las regiones visible e infrarrojo cercano; el recuadro muestra la componente roja del SC proyectada sobre una pantalla blanca. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024).

Dinámica temporal y potencia de salida.

La emisión temporal presenta una dinámica aleatoria. El tren de pulsos exhibe fluctuaciones tanto en intensidad como en la separación temporal entre pulsos consecutivos, comportamiento asociado con la naturaleza estocástica de los procesos de retrodispersión de Rayleigh y SBS. En la figura 4(a) se muestran trenes de pulsos registrados para diferentes potencias de bombeo. La frecuencia de repetición promedio aumenta casi linealmente con la potencia de bombeo, desde aproximadamente 2.9 kHz a 2.1 W hasta 5.0 kHz a 3 W, mientras que la potencia promedio de salida alcanza aproximadamente 160 mW a la máxima potencia de bombeo, como se observa en la Figura 4(b) (Alcántara-Bautista et al., 2024).

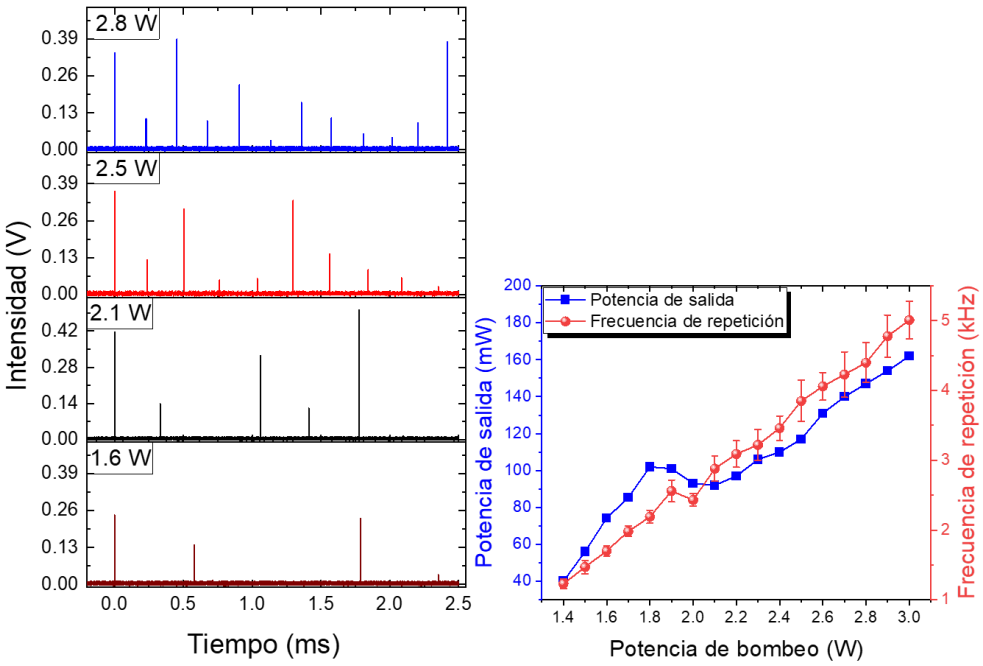


Figura 4. (a) Trenes de pulsos del régimen SQS aleatorio para diferentes potencias de bombeo y (b) evolución de la potencia promedio de salida y la frecuencia de repetición en función de la potencia de bombeo. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024).

Espectros de radiofrecuencia y perfil del pulso.

Los espectros de radiofrecuencia (RF) permiten corroborar el carácter pulsado y aleatorio de la emisión. A una potencia de bombeo de 3 W, el espectro alrededor de la frecuencia fundamental de repetición presenta una relación señal-ruido (SNR) cercana a 22.4 dB, como se muestra en la figura 5(a). Este valor relativamente bajo de SNR es consecuencia del carácter aleatorio de la emisión pulsada. En una ventana de frecuencia más amplia se observa además la estructura de batimiento asociada con los modos longitudinales de la cavidad, separados por 1.34 MHz, correspondiente al inverso del tiempo de ida y vuelta en la cavidad, como se aprecia en la figura 5(b) (Alcántara-Bautista et al., 2024).

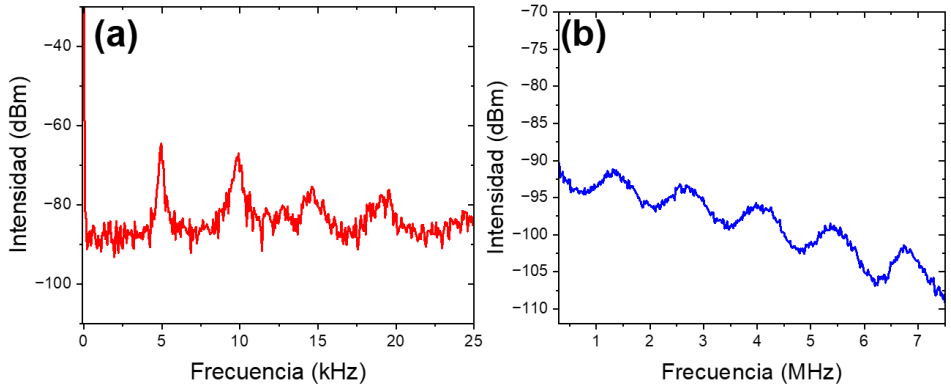


Figura 5. Espectros de RF del régimen pulsado a una potencia de bombeo de 3 W. (a) Espectro RF en un intervalo de barrido de 25 kHz y (b) espectro RF en un intervalo de 7.5 MHz, donde se observa el batimiento asociado con los modos longitudinales de la cavidad. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024). © 2023 Elsevier Ltd.

El perfil individual de los pulsos presenta una forma aproximadamente gaussiana, como se muestra en la figura 6(a). La duración de los pulsos permanece alrededor de 2.2 ns al variar la potencia de bombeo, mientras que la potencia pico estimada varía aproximadamente entre 15 y 20 kW, como se resume en la figura 6(b). Estas altas potencias pico son responsables del fuerte ensanchamiento espectral durante la propagación de los pulsos a través de la fibra SM-2000 (Alcántara-Bautista et al., 2024).

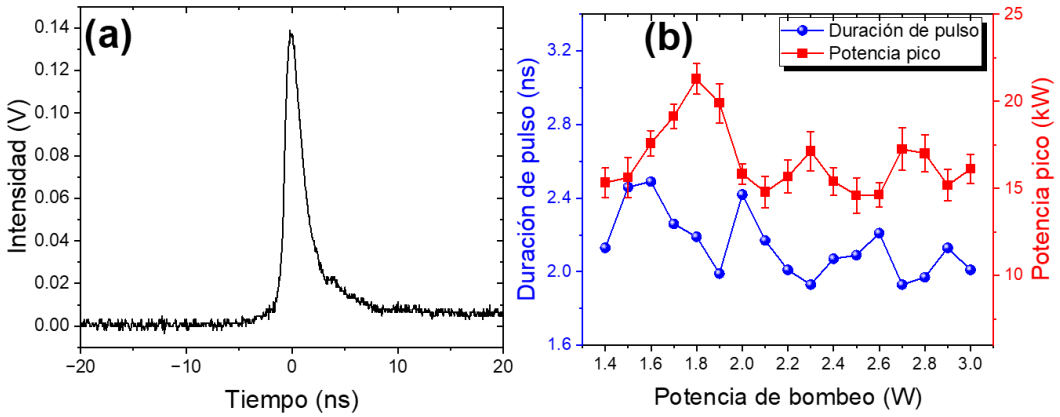


Figura 6. (a) Perfil temporal de un pulso SQS típico obtenido a una potencia de bombeo de 3 W y (b) evolución de la duración del pulso y de la potencia pico estimada en función de la potencia de bombeo. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024).

En conjunto, estos resultados muestran que el amplio ensanchamiento espectral observado resulta de la combinación entre la dinámica pulsada aleatoria de la cavidad y los procesos no lineales que ocurren durante la propagación por la fibra SM-2000. Las altas potencias pico alcanzadas por los pulsos SQS permiten generar un SC de gran anchura espectral y buena planitud mediante una configuración totalmente de fibra y sin recurrir a fibras no lineales especiales (Alcántara-Bautista et al., 2024).

Conclusiones.

Los resultados obtenidos demuestran que una cavidad totalmente de fibra en configuración F9 puede emplearse para generar pulsos aleatorios de alta potencia pico capaces de desencadenar fuertes efectos no lineales durante su propagación por un tramo de fibra SM-2000, dando lugar a la generación intracavitaria de SC. El sistema permitió obtener un SC que se extiende desde la región roja del visible (~600 nm) hasta en un borde de longitud de onda de 2200 nm, cubriendo más de una octava al excluir el pico principal y manteniendo una planitud espectral mejor que 5 dB de casi 885 nm. En conjunto, la configuración propuesta constituye una alternativa simple, compacta y de bajo costo para obtener emisiones de gran anchura espectral en sistemas completamente de fibra con gran potencial en espectroscopía óptica, tomografía de coherencia óptica, sensado e imagen biomédica.

Créditos.

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por la infraestructura experimental utilizada. El trabajo original resumido en este artículo recibió apoyo del proyecto CONACyT 287315. Los resultados experimentales, valores y figuras proceden de la publicación de Alcántara-Bautista et al. (2024), que puede consultarse para la descripción técnica completa, el tratamiento detallado de la literatura y las condiciones de medición.

Referencias bibliográficas.

Agrawal, G. P. (2011). *Nonlinear fiber optics: Its history and recent progress [invited]*. Journal of the Optical Society of America B, 28(12), A1–A10. https://doi.org/10.1364/JOSAB.28.0000A1.

Alcántara-Bautista, U., Durán-Sánchez, M., Espinosa-De-La-Cruz, E. A., Armas-Rivera, I., Bello-Jiménez, M., & Ibarra-Escamilla, B. (2024). *Intracavity ultra-broad supercontinuum generation from a figure-9 Yb-doped fiber laser*. Optics & Laser Technology, 168, 110016. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110016.

Dudley, J. M., Genty, G., & Coen, S. (2006). *Supercontinuum generation in photonic crystal fiber*. Reviews of Modern Physics, 78(4), 1135–1184. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1135.

Espinosa-de-la Cruz, E.A., Durán-Sánchez, M., Pottiez, O., Alcántara-Bautista, U., Alaniz-Baylón, J., Bello-Jiménez, M., Rodríguez-Morales, L. A., Armas-Rivera, I., & Ibarra-Escamilla, B. (2023). *Ultra-flat supercontinuum generation in an all-fiber self-Q-switched Er/Yb laser.* IEEE Photonics Technology Letters, 35(8), 454–457. https://doi.org/10.1109/LPT.2023.3254369.

He, J., Song, R., Jiang, L., & Hou, J. (2022). *Ultra-compact 50 W flat supercontinuum generation in single-stage self-Q-switched fiber laser with photonic crystal fiber*. IEEE Photonics Journal, 14(2), 1–6. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3156105.

Kaminski, C. F., Watt, R. S., Elder, A. D., Frank, J. H., & Hult, J. (2008). *Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy.* Applied Physics B, 92, 367–378. https://doi.org/10.1007/s00340-008-3132-1.

Poudel, C., & Kaminski, C. F. (2019). *Supercontinuum radiation in fluorescence microscopy and biomedical imaging applications.* Journal of the Optical Society of America B, 36(2), A139–A153. https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.00A139.

Skryabin, D. V., & Gorbach, A. V. (2010). *Colloquium: Looking at a soliton through the prism of optical supercontinuum.* Reviews of Modern Physics, 82(2), 1287–1299. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.1287.

Tu, H., & Boppart, S. A. (2013). *Coherent fiber supercontinuum for biophotonics.* Laser & Photonics Reviews, 7(5), 628–645. https://doi.org/10.1002/lpor.201200014.

Información de los autores.



Manuel Durán Sánchez, investigador con más de 20 años de experiencia en fibras ópticas, óptica no lineal, láseres de fibra y sensores ópticos. Es Ingeniero en Electrónica y obtuvo los grados de Maestro y Doctor en Optoelectrónica por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en 2003 y 2007, respectivamente. Realizó una estancia posdoctoral en el INAOE entre 2009 y 2010, institución donde posteriormente se incorporó como investigador en la Coordinación de Óptica. Su trabajo se centra en láseres de fibra, generación de pulsos, fuentes de banda ancha y sensado óptico. Es miembro vigente del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores hasta 2028, Senior Member de Optica (antes Optical Society of America, OSA) y Young Editorial Board Member

de High Power Laser Science and Engineering, distinción otorgada por Chinese Laser Press y Cambridge University Press para el periodo 2026–2028.



Edwin Addiel Espinosa de la Cruz, Ingeniero en Energía por la Universidad Politécnica de Chiapas, Maestro y doctor en ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Su trabajo de investigación se centra en el estudio y desarrollo de láseres de fibra óptica pulsados, óptica no lineal, dinámica de pulsos y generación de supercontinuo, particularmente en las regiones espectrales del infrarrojo cercano y medio. Ha participado como autor y coautor en trabajos científicos relacionados con láseres de fibra dopados con tierras raras, generación de pulsos mediante conmutación Q y amarre de modos, así como fenómenos no lineales en fibras ópticas.



Ulises Alcántara Bautista, Licenciado en Física por la Universidad Autónoma Metropolitana, Maestro en Ciencias en la Especialidad de Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente es Candidato a Doctorado en Ciencias en la Especialidad de Óptica por el INAOE, en donde sus líneas de investigación se centran en la generación de supercontinuo en fibras ópticas, así como láseres de fibra óptica pulsados de alta potencia.



Baldemar Ibarra Escamilla, obtuvo el grado de Licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en 1994. Recibió los grados de Maestría y Doctorado en Óptica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 1996 y 1999, respectivamente. Realizó una estancia Postdoctoral y un año Sabático en la Universidad de Dayton, USA; durante el 2000 y de julio de 2008 a julio de 2009, respectivamente. Actualmente está interesado en la modelación, simulación y experimentos en óptica lineal y no lineal. Sus tópicos de investigación incluyen: fenómenos lineales y no lineales, sensores, y amplificadores de fibra óptica; láseres sintonizables, láseres de amarre de modos y láseres de alta potencia de fibra óptica. Es “Fellow Member” de la International Society for Optical Engineering (SPIE), “Senior Member” de “Optica” (antes OSA), miembro de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), miembro regular de la Sociedad Mexicana de Física (SMF) y de la Academia Mexicana de Óptica (AMO). Es investigador Titular “D” y pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investicadores (SNII) con el Nivel III.