

DOI: <https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2025-108>

EFECTO DE LA CORRIENTE PULSADA SOBRE LA ESTABILIDAD DEL ARCO EN SOLDADURA HÚMEDA CON ELECTRODO REVESTIDO

Castellanos Gonzalez, Orlando Mauricio

Universidad Federal de Santa Catarina, LABSOLDA
Florianópolis, Brasil

mauricio.castellanos@posgrad.ufsc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-4490>

Moreno Uribe, Andrés Mauricio

Leibniz Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde (Materials Science)
Hanover, Alemania

uribe@iw.uni-hannover.de

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6717-0782>

Rodríguez Arias, Ariel

Universidad Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil

arielra@demec.ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6213-0076>

Gonçalves e Silva, Regis Henrique

Universidad Federal de Santa Catarina, LABSOLDA
Florianópolis, Brasil

regis.silva@ufsc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0660-6495>

Sanchez Quintana, Duvan

Universidad Federal de Santa Catarina, LABSOLDA
Florianópolis, Brasil

dsanchezq@ufpso.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2971-3453>

Sanchez Lobo, Eduardo Jose

Universidad Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil

ejsanchezl@ufpso.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5094-2499>

RESUMEN

La soldadura a arco con electrodo revestido continúa siendo la técnica predominante para la reparación de estructuras submarinas. No obstante, enfrenta desafíos operacionales como la inestabilidad del arco provocada por la constricción del arco a medida que aumenta la profundidad de operación y por el rápido enfriamiento debido al contacto directo con el agua. Con el fin de mitigar estas limitaciones, este estudio evalúa la aplicación de corriente pulsada. Fueron depositados cordones de soldadura en una cámara hiperbárica a 0.3 y 30 m de profundidad, en

polaridad directa e inversa, utilizando una fuente de poder con control electrónico de la corriente que permitió aplicar modulación pulsada manteniendo constante la corriente media. Los resultados muestran que la tensión de arco disminuye con la profundidad, siendo más elevada en polaridad inversa. Asimismo, la inestabilidad, medida a través de la desviación estándar de la tensión, aumentó tanto con la profundidad como con mayores amplitudes de corriente. Se comprobó que el incremento de la frecuencia de pulso constituye una estrategia eficaz para reducir la inestabilidad del arco, especialmente en aguas poco profundas, al disminuir la desviación estándar de la tensión. En conclusión, los hallazgos confirman que la corriente pulsada representa una alternativa prometedora para mejorar la estabilidad del arco, la operabilidad y el control del proceso en soldadura submarina.

Palabras clave: Corriente modulada, electrodo revestido, estabilidad del arco, frecuencia de pulso, soldadura subacuática.

ABSTRACT

Shielded metal arc welding (SMAW) remains the predominant technique for repairing underwater structures. However, it faces operational challenges such as arc instability caused by arc constriction with increasing operating depth and by the rapid cooling effect due to direct contact with water. To address these limitations, this study evaluates the application of pulsed current. Bead-on-plate welds were deposited inside a hyperbaric chamber at depths of 0.3 m and 30 m, using both straight and reverse polarity. An electronically controlled power source enabled the application of pulsed waveform modulation while maintaining the same average current. The results show that arc voltage decreases with depth, with higher values observed under reverse polarity. Moreover, instability, quantified by the standard deviation of arc voltage, increases with both depth and higher current amplitudes. It was demonstrated that increasing pulse frequency is an effective strategy to mitigate arc instability, particularly in shallow water, by reducing the standard deviation of arc voltage. In conclusion, the findings confirm that pulsed current represents a promising approach to improve arc stability, operability, and process control in underwater welding.

Keywords: Arc stability, coated electrode, modulated current, pulse frequency, underwater welding.

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura submarina, que incluye desde plataformas petroleras hasta oleoductos y estructuras de energía renovable, constituye un componente esencial de la economía global. Sin embargo, estas construcciones están sometidas a la presión hidrostática y condiciones operacionales adversas, lo que hace inevitable la ejecución de trabajos de mantenimiento y reparación. En este contexto, la soldadura húmeda con electrodo revestido se mantiene como la solución más práctica y económicamente viable, al permitir que los soldadores trabajen directamente en el medio acuático sin recurrir a costosas cámaras secas. No obstante, esta técnica enfrenta limitaciones significativas. El contacto directo del arco con el agua provoca rápido enfriamiento e inestabilidad, factores que comprometen la calidad del cordón depositado. Entre las estrategias emergentes para enfrentar este desafío, la aplicación de corriente pulsada se presenta como una alternativa prometedora. Este enfoque, posible gracias al desarrollo de fuentes de poder electrónicas avanzadas, permite modular la corriente de forma controlada, ofreciendo ventajas significativas para la mejora del proceso. En este sentido, el presente trabajo se centra en evaluar el potencial de la corriente pulsada como técnica de control para incrementar la estabilidad del arco en condiciones subacuáticas, con el objetivo de consolidar procedimientos de soldadura más confiables y eficientes.

2. MARCO CONCEPTUAL

La soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) es la técnica más difundida en reparaciones submarinas debido a su simplicidad, bajo costo y facilidad de aplicación en campo (Castellanos-Gonzalez et al., 2021). Sin embargo, su desempeño se ve fuertemente limitado por la inestabilidad del arco, fenómeno que se intensifica con el aumento de la presión hidrostática y al efecto de enfriamiento acelerado debido a el contacto con el agua (Castellanos-Gonzalez et al., 2025). Diversos estudios han demostrado que variables como la polaridad, las características del electrodo y la profundidad influyen en la estabilidad del arco (Moreno-Uribe et al., 2017). En este contexto, ha surgido un creciente interés en el desarrollo de tecnologías orientadas a controlar las oscilaciones de tensión y a mitigar la inestabilidad generada por el intenso intercambio de calor con el medio acuático (Castellanos-Gonzalez et al., 2022a). Dentro de estas alternativas, la corriente pulsada surge con gran potencial de aplicación. Ampliamente utilizada en procesos como GMAW y GTAW para optimizar el control del arco y el aporte térmico, la corriente pulsada permite regular la dinámica de transferencia metálica y la distribución de energía mediante modulación electrónica (Modenesi & Moreno-Uribe, 2022). Su incorporación a la soldadura SMAW en ambiente subacuático, aunque poco explorada, ha mostrado resultados interesantes: una disminución de la desviación estándar de la tensión de arco y una mayor estabilidad operativa, particularmente en condiciones de aguas poco profundas (Castellanos-Gonzalez et al., 2022b; Moreno-Uribe et al., 2024). De esta manera, el uso de corriente pulsada se perfila como una estrategia para mejorar la calidad y la confiabilidad de la soldadura húmeda, constituyendo una herramienta clave para superar las limitaciones tradicionales del proceso en entornos marinos exigentes (Castellanos-Gonzalez, 2024).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo empleó una metodología experimental para la obtención de los cordones de soldadura y un enfoque estadístico para analizar la influencia de los parámetros en la tensión del arco y su desviación estándar. Los cordones fueron depositados en posición plana dentro de una cámara hiperbárica diseñada para simular condiciones de 0.3 y 30 m de profundidad. Se utilizó un electrodo revestido de tipo rutilico-oxidante de 3.25 mm de diámetro y placas de acero AH-36 de 19 mm de espesor como metal base. La fuente de poder empleada permitió un control electrónico preciso de los parámetros de corriente pulsada (En la Tabla 1 son mostrados los valores configurados). La señal de tensión del arco fue registrada a una frecuencia de 5000 Hz mediante un sistema de adquisición de datos. La tasa de fusión del electrodo, expresada en mm/s, se determinó dividiendo la longitud del electrodo consumido (mm) por el tiempo total de soldadura (s). El diseño experimental consideró cuatro factores: amplitud de la corriente (40 A y 100 A), frecuencia de pulso (10 Hz y 125 Hz), polaridad (directa e inversa) y profundidad (0.3 m y 30 m), siendo ejecutadas tres réplicas para combinación de los factores. Todos los parámetros fueron configurados de manera que la corriente media se mantuviera constante en 150 A. Finalmente, los resultados fueron analizados mediante modelos de regresión lineal, siguiendo la metodología propuesta por Castellanos-Gonzalez (2024).

Tabla 1
Parámetros de corriente pulsada utilizados en los experimentos

Amplitud de corriente (A)	Frecuencia de pulso (Hz)	Corriente de pulso – I _p (A)	Corriente de base – I _b (A)	Tiempo de pulso – t _p (ms)	Tiempo de base – t _b (ms)
40	10	170	130	50	50
40	125	170	130	4	4
100	10	200	100	50	50
100	125	200	100	4	4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 presenta los modelos de regresión lineal obtenidos. La Figura 1 muestra que, al pasar de polaridad directa (DCEN) a inversa (DCEP), la tensión del arco aumentó de 22.6 V a 24.6 V, en concordancia con Tsai & Masubuchi (1977), quienes lo atribuyeron a la mayor longitud de arco asociada a DCEP. En contraste, el incremento de la profundidad redujo el valor medio en un 12.4 %. Asimismo, mayores tasas de fusión generaron un aumento de 20 % en el valor medio, efecto explicado por Castellanos-Gonzalez et al. (2022b) como consecuencia del mayor consumo instantáneo de electrodo, que incrementa la distancia entre la punta y el charco de soldadura.

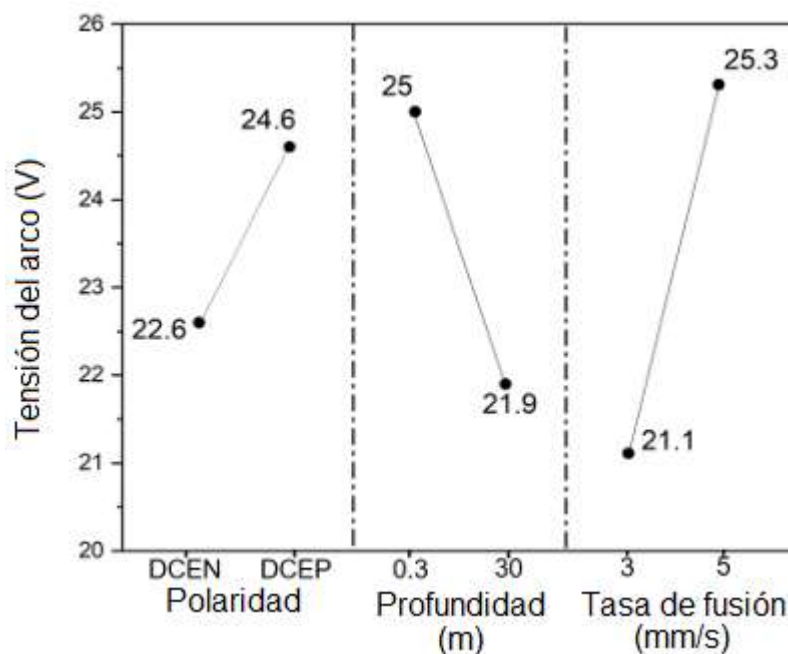
Tabla 2

Modelos de regresión obtenidos para la tensión del arco y su desviación estándar

Modelos de regresión	R ²
Tensión del arco = 17.39 + 0.941 Polaridad - 0.1016 profundidad + 1.881 tasa de fusión	90.07 %
Desviación estándar de la tensión del arco = 2.233 + 0.03278 Amplitud de la corriente - 0.3048 Polaridad - 0.000203 Amplitud de la corriente *frecuencia de pulso + 0.000376 frecuencia de pulso*profundidad	88.37%

Figura 1

Efecto de la polaridad, profundidad y tasa de fusión en el valor medio de la tensión del arco



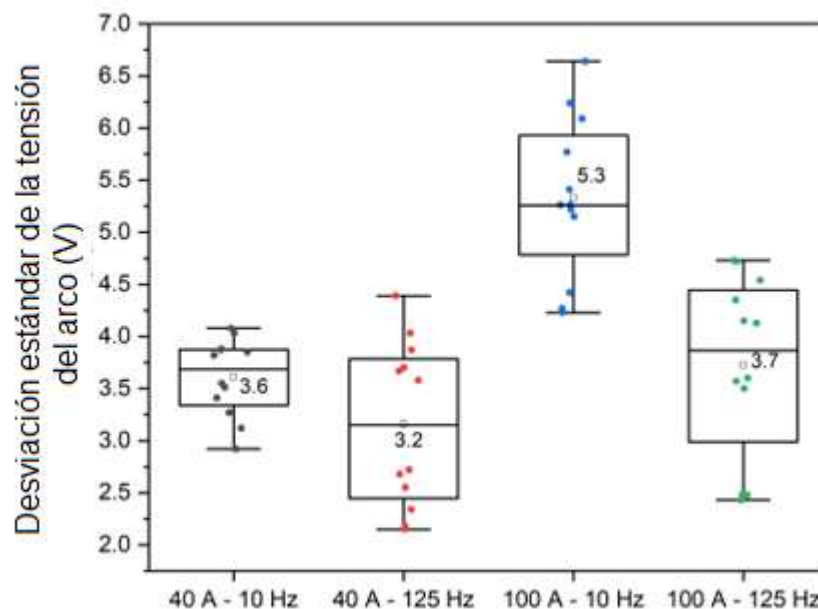
Nota. Los valores presentados corresponden a medias ajustadas, calculadas de manera que reflejan únicamente efectos estadísticamente significativos.

La Figura 2 muestra que, a mayor amplitud de corriente, los valores medios de desviación estándar aumentan, indicando mayor inestabilidad del arco. Esto se debe a que la corriente base de 100 A resulta insuficiente para mantener una fusión estable y favorece el incremento de cortocircuitos que perturban el arco. Sin embargo, al elevar la frecuencia de pulso a 125 Hz, la desviación estándar se redujo significativamente. Frecuencias más altas atenúan las oscilaciones de tensión del arco propias del entorno acuático y, mediante la aplicación periódica

de pulsos de corriente, se evitan caídas pronunciadas, logrando una señal más estable y con menor dispersión, en concordancia con Pope et al. (1998). La Figura 3 muestra que el efecto del aumento de la frecuencia de pulso en la desviación estándar media de la tensión es menos pronunciado a 30 m de profundidad que en aguas poco profundas (0.3 m). A 0.3 m, elevar la frecuencia reduce la desviación estándar en un 39 %, mientras que a 30 m solo se logra un 9 %. Esto coincide con Chen et al. (2018), quienes observaron que la variación de la tensión aumenta con la profundidad debido a perturbaciones inducidas por la presión hidrostática. De manera similar, Moreno-Uribe et al. (2020) señalan que la constricción del arco compromete la estabilidad del proceso. La Figura 4 muestra que cambiar la polaridad de DCEN a DCEP reduce la desviación estándar media de la tensión en un 14 %. Castellanos-Gonzalez et al. (2024) reportaron mayor inestabilidad y más cortocircuitos en DCEN durante soldadura húmeda con núcleo fundente.

Figura 2

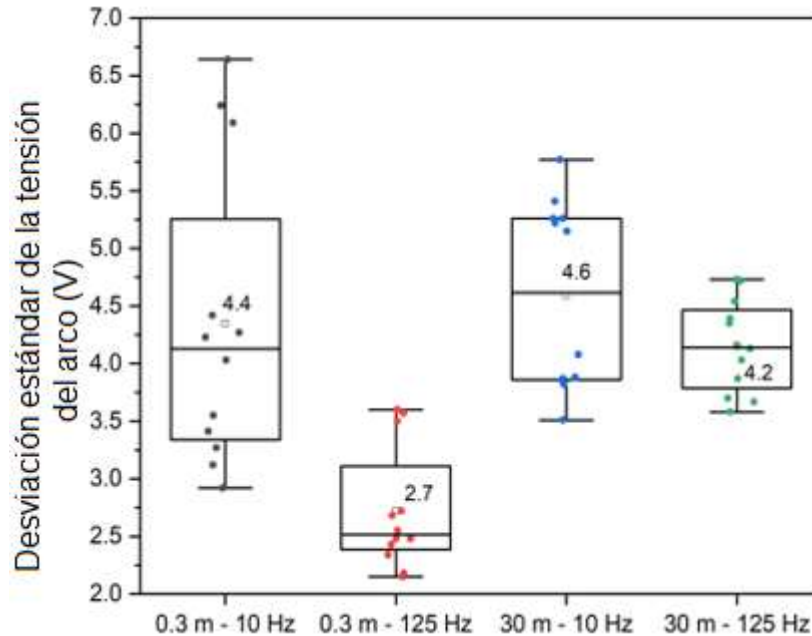
Efecto de la amplitud de corriente y la frecuencia de pulso en el valor medio de la desviación estándar de la tensión del arco



Nota. Los valores presentados corresponden a medias ajustadas, calculadas de manera que reflejan únicamente efectos estadísticamente significativos.

Figura 3

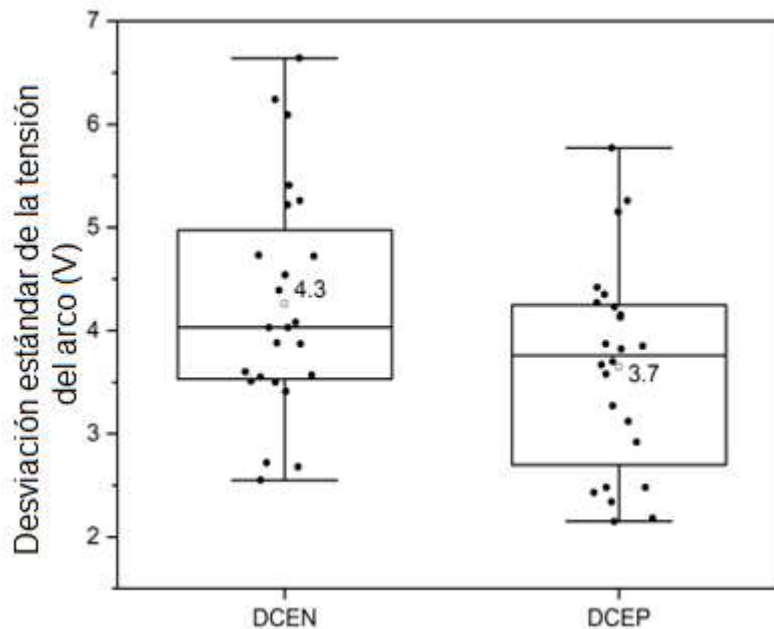
Efecto de la frecuencia de pulso y la profundidad en el valor medio de la desviación estándar de la tensión del arco



Nota. Los valores presentados corresponden a medias ajustadas, calculadas de manera que reflejan únicamente efectos estadísticamente significativos.

Figura 4

Efecto de la polaridad en el valor medio de la desviación estándar de la tensión del arco



Nota. Los valores presentados corresponden a medias ajustadas, calculadas de manera que reflejan únicamente efectos estadísticamente significativos.

5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la corriente pulsada constituye una herramienta efectiva para mejorar la estabilidad del arco en soldadura húmeda con electrodo revestido. La desviación

estándar de la tensión del arco aumenta con la amplitud de corriente, reflejando mayor inestabilidad, mientras que el incremento de la frecuencia de pulso atenúa estas oscilaciones, estabilizando la señal incluso a corriente base menores. La efectividad de la modulación pulsada disminuye con la profundidad, observándose reducciones menores de desviación estándar a 30 m que a 0.3 m, lo que evidencia el impacto de la presión hidrostática en la dinámica del arco. Asimismo, la polaridad DCEP contribuye a una menor inestabilidad en comparación con DCEN. En conjunto, estos hallazgos confirman que la corriente pulsada permite controlar las perturbaciones inducidas por el medio acuático, optimizando la operabilidad del proceso y ofreciendo una estrategia práctica para aumentar la confiabilidad y la calidad de la soldadura submarina, especialmente en aplicaciones críticas.

REFERENCIAS

- Castellanos-Gonzalez, O. M. (2024). *A study of the effect of pulsed current parameters in wet welding with a coated electrode* [Monografía de maestría, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil]. <http://hdl.handle.net/1843/73872>.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Moreno-Uribe, A. M., Rodríguez, A., & Jácome, J. (2022a). Particularidades de la transferencia metálica y la aplicación de corriente pulsada en soldadura submarina. *Revista UIS Ingenierías*, 21(4), 1–14. <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n4-2022001>.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Moreno-Uribe, A. M., Sanchez-Lobo, E., Rodriguez, A., Silva, R. H. G., & Hassel, T. (2025). Pulsed shielded metal arc welding: A new approach for underwater applications. *Welding in the World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02095-2>.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Prada, G., Moreno-Uribe, A. M., Rodríguez, A., & Jácome, J. (2021). Manufactura de alambre tubular autoprotegido y evaluación de condiciones operacionales en soldadura submarina. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(1), 167–179. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4015>.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Rodriguez, A., & Gonçalves, R. (2022b). *Análise exploratória do comportamento da tensão do arco na soldagem molhada com eletrodos revestidos utilizando uma fonte eletrônica especializada* [Apresentação de artigo, Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG], Belo Horizonte, Brasil.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Sanchez-Lobo, E. J., Fydrych, D., Silva, B., Fagundes, J. G., & Moreno-Uribe, A. M. (2024). Operational performance and weld bead characteristics of experimental tubular-wires for underwater welding. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(8), 433–447. <https://doi.org/10.12913/22998624/193525>.
- Chen, H., Guo, H., Shi, X., Du, Y., Feng, J., & Wang, G. (2018). Effect of hydrostatic pressure on protective bubble characteristic and weld quality in underwater flux-cored wire wet welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.037>.
- Modenesi, P. J., & Moreno-Uribe, A. M. (2022). *Introduction to the physics of the electric arc and its application to the welding of metals*. Ecoe Ediciones.
- Moreno-Uribe, A. M., Bracarense, A. Q., & Pessoa, E. C. (2020). The effect of polarity and hydrostatic pressure on operational characteristics of rutile electrode in underwater welding. *Materials*, 13(21), 5001. <https://doi.org/10.3390/ma13215001>
- Moreno-Uribe, A. M., Bracarense, A. Q., Pessoa, E. C. P., & Santos, V. R. (2017). Influência da polaridade sobre a estabilidade do processo de soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido. *Soldagem & Inspeção*, 22(4), 29–41. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2204.13>

- Moreno-Uribe, A. M., Vaccari, L., Bracarense, A. Q., Maier, H. J., & Hassel, T. (2024). Operational performance and metal droplet formation in pulsed-shielded metal arc underwater welding. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24, 94. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00916-7>
- Pope, A. M., Teixeira, J. C., Baixo, C., Teichmann, E., & Dutra, J. (1998). *Influence of power supply dynamic response on underwater wet welding arc stability* [Presentación de artículo]. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Lisboa, Portugal.
- Tsai, C. L., & Masubuchi, K. (1977). *Interpretive report on underwater welding* (No. 224). Welding Research Council.

Los autores del trabajo autorizan a la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología (UNICYT) a publicar este resumen en extenso en las Actas del Congreso IDI-UNICYT 2025 en Acceso Abierto (Open Access) en formato digital (PDF) e integrarlos en diversas plataformas online bajo la licencia CC: Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

La Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología y los miembros del Comité Organizador del Congreso IDI-UNICYT 2025 no son responsables del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en este artículo.