Vol.14 Núm.3

ISSN 2007-5448

RECIBE

Revista electrónica

DE COMPUTACIÓN, INFORMÁTICA, BIOMÉDICA Y ELECTRÓNICA

Índice

Computación e Informática

La batalla entre julia, python y r por el dominio en ciencia de datos y desarrollo

C1-15

Jessica Mendoza, Aristeo Garrido Hernández, Jesús Barrón Vidales, Roberto Efraín Uribe Capulín

El Entrenamiento de una red neuronal de seguimiento de señales: un enfoque metaheurístico mediante optimización por enjambre de partículas

C2-12

Alma Aide Sánchez Ramírez, Dr. Alvaro

Protección de Datos Biométricos en Vídeos Disponibles en Datasets Mediante Face Swapping

C3-17

Héctor Caballero Hernández, Vianney Muñoz Jiménez, Marco Antonio Ramos Corchado

Biomédica

Nanoemulsiones: Definición, métodos de síntesis, caracterización y aplicaciones biomédicas

B1-19

Abraham Gabriel Alvarado Mendoza, Valeria Sánchez González, Rosaura Hernández Montelongo, Alejandra Cruz Hernández

El Implementación de Sistema para el estudio de reflejos pupilares con estímulos de colores azul y blanco

B2-19

Rodrigo Hernandez Moncayo, Asdrúbal López Chau, Carlos Omar González Morán, Ernesto Suaste Gómez, Jose de Jesus Agustin Flores Cuautle, Juan Carlos Belen Luna

Hidrogeles: propiedades, clasificación y avances recientes

B3-17

Abraham Gabriel Alvarado Mendoza, Samuel Abiud Garnica Duran, Ana María Alfaro Ziranda, Rosaura Hernández Montelongo

LUDICON

AI-Driven Adaptive Learning in Educational Games

L1-16

Michel Lopez Franco, Dariana Gomez Alvarez, David Bonilla Carranza, Carlos Lopez Franco, Lilibet Lopez Franco

Rediseño de Emotion4Us: un videojuego para apoyar la conciencia emocional de las personas con discapacidad intelectual

L2-12

Andrea Rivas Gómez, Antonio Ramos Gonzalez, Marisela Hernández Lara, Brayan Ivan Perez Ventura, Ana I. Martínez García, Karina Caro

Rediseñando Odisea Emocional, una herramienta basada en gamificación para apoyar la regulación emocional de personas con discapacidad intelectual

L3-12

Teresa Rivas Gómez, Marisela Hernández Lara, María Fernanda López Merino, Ximena Vargas Gámez, Ana I. Martínez García, Karina Caro

Uso de un Videojuego Cooperativo para Evaluar la Comunicación en Equipos Distribuidos de Desarrollo de Software

L4-11

Zeus Emanuel Gutierrez Cobian, Adriana Peña, David Bonilla Carranza

Ecosistemas gamificados de aprendizaje para el desarrollo cognitivo temprano

L5-8

Brandon Alejandro Ponce Aragón

Gamificación y emprendimiento en Gastronomía: experiencia educativa con retos Shark Tank en el ITSX

Cynthia Judith Sánchez Martínez, Virginia Lagunes Barradas, Lilia Licea Hernández, Erika María Ronquillo Mandujano, Rosalía Daza Merino, Margarita del Carmen Torres Morales **L6-10**

Lecciones Aprendidas de la Literatura: Buenas Prácticas en el Diseño de Mecánicas para Diferentes Géneros de Videojuegos

Jose Luis David Bonilla Carranza, Jose Esteban Hernandez De Leon, Veronica Camacho Santillan, Erendira Alvarez Tostado Martinez, Erick Jorge Roberto Guerrero Muñoz **L7-11**

How Psychology and Game design intersect for transformation

Tina Marie del Rosario **L8-6**

LAEDC

PET-CT Registration: Comparative Affine and Deformable Methods

LA_1-3

Adriana M Flores Bacilio, Francisco J. Álvarez Padilla, Stewart R. Santos Arce

El Detección de ELA utilizando Análisis Frecuencial con Aprendizaje Automático

LA_2-4

Alejandro Diaz Montes de Oca, Ricardo Antonio Salido Ruíz, Stewart René Santos Arce

Color Space Assessment for Automatic Chronic Wound Segmentation

LA_3-4

Angela Fernanda Palacios Gaxiola, Stewart R. Santos Arce, Sulema Torres Ramos, Israel Román Godínez, Ricardo Antonio Salido Ruiz

Reconocimiento de Entidades Biomédicas usando un Modelo de Lenguaje Pequeño

LA_4-4

Amed Clavería Méndez, Israel Roman Godínez, Sulema Torres Ramos, Stewart Rene Santos Arce

COMPUTATION E INFORMATICA

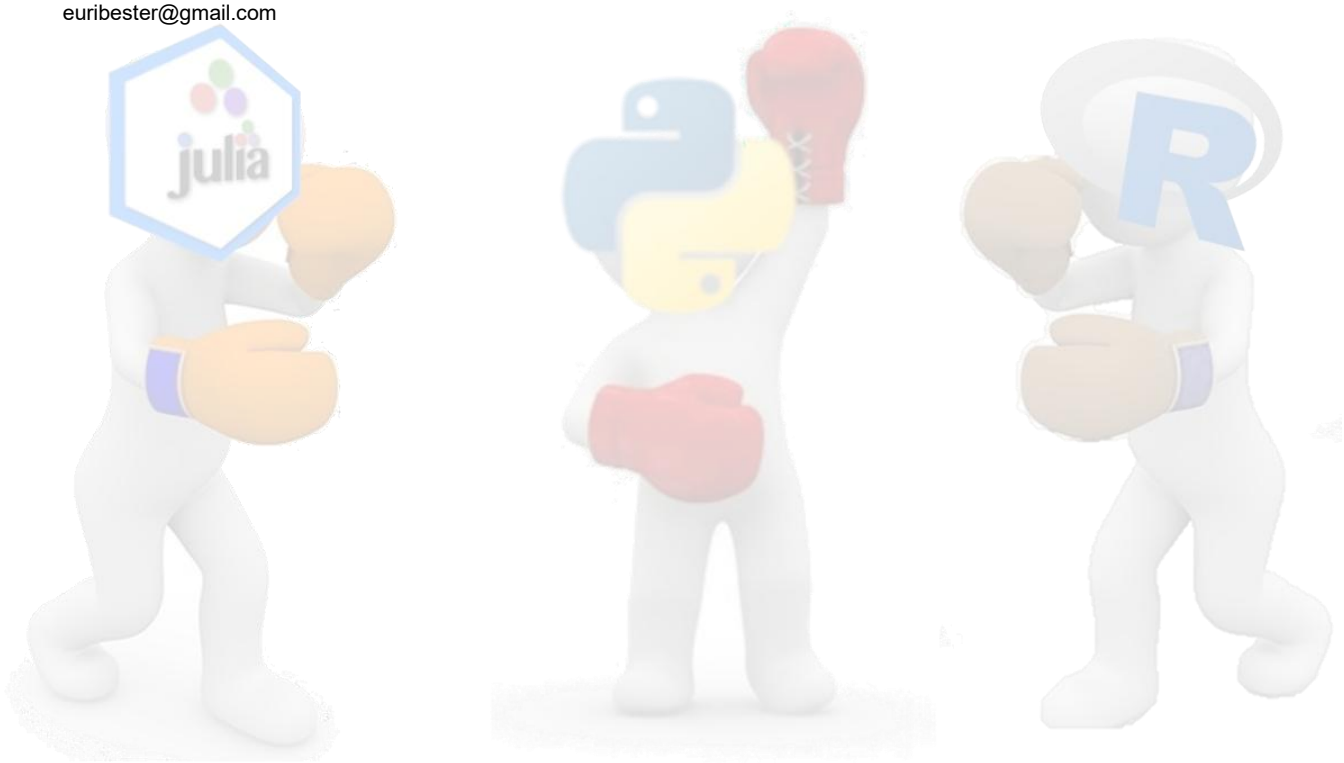
Recibido 14 May. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 28 Jul. 2025

La batalla entre julia, python y r por el dominio en ciencia de datos y desarrollo

The competition among julia, python and r for leadership in data science and development

Jessica Mendoza
jessica.mendoza.j0610@gmail.com*
Aristeo Garrido Hernández[1]
agh@azc.uam.mx
Jesús Barrón Vidales
jbarronv@uttecamac.edu.mx
Roberto Efraín Uribe Capulín
euribester@gmail.com



[1] Universidad Autónoma Metropolitana

RESUMEN

Este estudio compara los lenguajes Julia, Python y R en el contexto de la ciencia de datos y el desarrollo de software. Evaluando rendimiento, bibliotecas, comunidad y licencias, mediante pruebas de velocidad —incluyendo operaciones matriciales, manipulación de datos y visualización— se observó que Julia es más rápido en cálculos numéricos, ideal para computación científica, mientras que Python ofrece equilibrio, es eficiente en procesamiento de datos y gráficos y tiene un ecosistema robusto y una gran comunidad en línea. Por su lado R sobresale en análisis estadístico y visualización, pero es más lento en tareas intensivas.

En el ámbito del desarrollo web, Python domina con frameworks maduros como Django y Flask, mientras que las alternativas en R (Shiny) y Julia (Genie) tienen un alcance limitado, además de la diferencia de licencias; Julia y Python utilizan MIT y PSF que son flexibles, adecuadas para proyectos comerciales, mientras que R emplea GPL que es más restrictiva.

Aunque cada lenguaje tiene fortalezas particulares, se observó observar que Python es versátil para proyectos generales, Julia destaca por su alto rendimiento y R sobresale en análisis estadístico. Por lo tanto, la elección del lenguaje depende del contexto y los objetivos del proyecto.

Palabras clave: Lenguajes de programación, Julia, Python, R, comparación, ciencia de datos, desarrollo de software.

ABSTRACT

This study compares Julia, Python, and R programming languages in the context of data science and software development. By evaluating performance, libraries, community support, and licensing, through conducting speed tests —including matrix operations, data manipulation, and visualization— it was observed that Julia is the fastest in numerical computations, making it ideal for scientific computing, while Python offers a balanced solution, it is efficient in data processing and graphics, and features a robust ecosystem and a large online community. R stands out in statistical analysis and visualization but is slower in computationally intensive tasks.

In the field of web development, Python leads with mature frameworks such as Django and Flask, while the alternatives in R (Shiny) and Julia (Genie) have more limited reach. Additionally, licensing differs: Julia and Python use MIT and PSF licenses, respectively, which are flexible and suitable for commercial projects, whereas R uses the GPL license, which is more restrictive.

Although each language has particular strengths, it was observed that Python is versatile for general projects, Julia stands out for its high performance and R excels in statistical analysis. Therefore, the choice of language depends on the context and objectives of the project.

Keywords: Programming languages, Julia, Python, R, comparison, data science, software development.

1. INTRODUCCIÓN

La revolución digital, impulsada por lenguajes de programación como Python, Julia y R, ha transformado radicalmente nuestra comprensión y análisis de datos. Estos tres lenguajes de programación no solo han acelerado el progreso en inteligencia artificial, biomedicina y negocios, sino que también han puesto poderosas herramientas al alcance de científicos, ingenieros y analistas de todo el mundo. Las necesidades en programación son amplias y varían según el área de especialización y el contexto temporal. Por ello, es fundamental presentar las características elementales de estos tres lenguajes de programación, con el objetivo de facilitar la elección del lenguaje que mejor se adapte a la tarea específica a realizar.

La sintaxis accesible y el vasto ecosistema de Python lo convierten en un pilar esencial para los desarrolladores de todos los niveles. Según el sitio web Python (Welcome To Python.org, 2024), millones de personas en todo el mundo utilizan el lenguaje debido a su facilidad de uso y versatilidad, un ejemplo reciente de su uso en las nuevas tecnologías es el que tuvo en en el desarrollo de modelos de inteligencia artificial de gran escala como GPT-3 y GPT-4 de OpenAI, donde se incluyeron bibliiotecas de aprendizaje automatic de Python y sus bibliotecas para la creación y el despliegue de estas tecnologías (Brown et al., 2020).

Con una velocidad de ejecución comparable a la de C y capacidades matemáticas avanzadas, Julia redefine los límites de la informática científica (Julia Documentation. The Julia Language, 2024). Eschle et al. (2023), en su artículo publicado en la revista *"Computing And Software For Big Science"*, destaca cómo Julia permite a los investigadores realizar cálculos complejos a velocidades increíbles, permitiendo descubrimientos científicos antes impensables, tal es el caso del proyecto Earthscope, donde Julia se utiliza para procesar grandes volúmenes de datos sísmicos y geodésicos (Nowacki, 2020).

Mientras tanto, R sigue siendo la opción académica preferida para el análisis estadístico y la visualización de datos, gracias a sus ricos paquetes especializados y su profundo impacto en la comunidad científica, (R: The R Foundation, 2024). Tierney (2012), afirma que la capacidad de R para procesar datos complejos y producir visualizaciones de alta calidad lo ha convertido en el estándar de facto en muchos campos científicos, además R cuenta con su propio ecosistema CRAN (The Comprehensive R Archive Network), que es la red que alberga y distribuye todos los paquetes de R, demostrando la capacidad del lenguaje para gestionar una infraestructura de software compleja para la comunidad estadística.

Este trabajo presenta una comparación entre los lenguajes de programación R, Julia y Python, considerando características clave como la facilidad para el desarrollo web, disponibilidad de bibliotecas, comunidad y soporte, velocidad de procesamiento y aspectos de propiedad intelectual. El objetivo es ofrecer un análisis cuantitativo y cualitativo que facilite una toma de decisiones informada para el desarrollo de programas computacionales.

2. FACILIDAD EN EL DESARROLLO WEB: UN ANÁLISIS DE R, PYTHON Y JULIA

El desarrollo web ha evolucionado significativamente en los últimos años y los lenguajes de programación utilizados se han diversificado. Tradicionalmente, lenguajes como JavaScript y PHP han sido dominantes en esta área, pero cada vez se adoptan más lenguajes como Python, R y Julia. Aunque estos lenguajes fueron desarrollados originalmente para programación científica y análisis de datos, también han demostrado ser herramientas poderosas en el campo del desarrollo web., (Holovaty y Kaplan-Moss, 2009). Según Van Rossum y Drake (2011), este lenguaje presenta características de integración y una extensa biblioteca estándar que simplifica el desarrollo de aplicaciones complejas.

Conocido por su simplicidad y legibilidad, Python por ejemplo facilita la creación de aplicaciones web sólidas y escalables gracias a marcos como Django y Flask. Django es particularmente elogiado por su enfoque en promover la reutilización de componentes y prácticas de desarrollo limpias y eficientes. Según Van Rossum (2011), creador de Python, el lenguaje presenta características de integración y una extensa biblioteca estándar que simplifica el desarrollo de aplicaciones complejas.

Por su parte R se asocia más comúnmente con el análisis estadístico y la visualización de datos, pero también ha encontrado su lugar en el desarrollo web a través de paquetes como Shiny, que permite a los desarrolladores crear aplicaciones web interactivas, haciendo que las herramientas avanzadas de visualización y análisis sean accesibles para todos, incluso para los usuarios con poca experiencia en programación. Wickham (2016) destaca la capacidad de este paquete para transformar el análisis de datos en tiempo real en aplicaciones web accesibles, facilitando la difusión de resultados y la toma de decisiones basada en datos.

En el caso de Julia que es un lenguaje relativamente nuevo, ha logrado combinar la velocidad de los lenguajes compilados como C con la simplicidad de los lenguajes de alto nivel. Su diseño está optimizado para la informática numérica y de alto rendimiento, pero también se extiende al desarrollo web. Julia permite a los desarrolladores utilizar marcos como Genie para crear aplicaciones web rápidas y eficientes e integrar capacidades avanzadas de análisis de datos directamente en la web, (julialang.org,2024).

Si bien R y Julia ofrecen excelentes capacidades de análisis de datos y computación de alto rendimiento, Python es una mejor opción para el desarrollo web gracias a su simplicidad, legibilidad y ecosistema robusto de marcos como Django y Flask. Este lenguaje se destaca como la opción más versátil y eficiente. La flexibilidad de Python permite a los desarrolladores crear fácilmente aplicaciones web escalables y eficientes. Ha sido ampliamente adoptado en la industria tecnológica y está respaldado por la capacidad de integrarse con otras tecnologías.

3. DUELO DE BIBLIOTECAS: HERRAMIENTAS ESENCIALES EN R, JULIA Y PYTHON

Las bibliotecas y herramientas de lenguajes de programación especializados son esenciales para desarrollar e implementar soluciones complejas en diversos campos, incluida la ciencia de datos y el desarrollo web La popularidad de los lenguajes de programación R, Julia y Python está aumentando debido a su capacidad para simplificar tareas complejas.

Estos tres lenguajes han sido ampliamente utilizados para el análisis y ciencia de datos, cada uno tiene su propia biblioteca de herramientas de visualización de datos y kits de herramientas especializados. R ofrece ggplot2 que crea gráficos sofisticados y altamente personalizables utilizando una gramática gráfica consistente (Wickham, 2016). Plots.jl permite la creación de gráficos complejos y personalizables se incluye con Julia (Bezanson et al., 2017). Por otro lado, Python tiene Matplotlib, que ofrece una amplia gama de funciones para crear gráficos de alta calidad y es similar a ggplot2 en términos de flexibilidad y capacidad de personalización (Hunter, 2007).

En cuanto a la manipulación de datos, R incluye dplyr, que facilita esta tarea con una sintaxis intuitiva para filtrar, seleccionar y transformar conjuntos de datos, mientras que tidyr se usa para limpiar y organizar datos, lo que permite transformarlos en formatos más útiles para el análisis. (Wickham et al., 2021; Wickham y Henry, 2021). DataFrames.jl es una herramienta eficiente para la manipulación y transformación de datos en estructuras de datos tabulares que es similar a la funcionalidad de dplyr y tidyr (Bezanson et al., 2017). Python contiene una poderosa biblioteca llamada Pandas que permite operaciones eficientes de limpieza, transformación y agregación de datos. Su sintaxis intuitiva es similar a la de dplyr y tidyr de R (McKinney, 2010).

Además de potentes herramientas para visualización y manipulación de datos, R, Julia y Python también proporcionan bibliotecas especializadas para aplicaciones web interactivas y aprendizaje automático, Shiny permite a los usuarios crear aplicaciones web interactivas directamente, lo que permite compartir análisis de datos y visualizaciones interactivas (Chang et al, 2021), Dash.jl de Julia proporciona una funcionalidad similar a Shine que permite el desarrollo de aplicaciones web interactivas para compartir resultados de análisis de datos (Plotly Technologies Inc.,2019). Python cuenta con Streamlit, según su sitio web streamlist.io, (2024) actualmente esta herramienta se ha vuelto extremadamente popular debido a su enfoque en la simplicidad y facilidad de uso para crear rápidamente aplicaciones web interactivas, permite que desarrolladores y científicos de datos creen interfaces de usuario interactivas para visualizar datos, realizar análisis y compartir resultados de manera efectiva.

Kuhn, (2021), destaca la naturaleza única de R en el ámbito de machine learning con el uso de Caret, una biblioteca que proporciona una interfaz unificada para diversos métodos y técnicas de modelado para entrenar y evaluar modelos predictivos. Julia propone MLJ.jl, una herramienta de aprendizaje automático que ofrece una interfaz unificada parecida a caret, lo que permite la evaluación y comparación de varios modelos (Blaom et al, 2020). El ecosistema de aprendizaje automático de Python está respaldado por una biblioteca popular, scikit-learn, que proporciona un conjunto completo de algoritmos y herramientas para entrenar y evaluar modelos predictivos, según Pedregosa et al, (2011).

En la tabla 1 se muestra las comparaciones entre las bibliotecas para machine learning, desarrollo web y creación de gráficas interactivas para cada lenguaje.

Tabla 1. Comparativa de las bibliotecas disponibles en cada lenguaje de programación (R, Python y Julia), organizadas según su capacidad para la visualización de gráficos, el aprendizaje automático y el desarrollo web. El ecosistema de bibliotecas de Python es más extenso en comparación con R y Julia. La

versatilidad de Python y su amplia gama de aplicaciones son notables, con ejemplos que incluyen desarrollo web con Django y flask (Holovaty et al, 2013; Grinberg, 2018), ciencia y análisis de datos con pandas (Mckinney, 2010), visualización con Matplotlib y Seaborn (Hunter, 2007; Waskom, 2021), y aprendizaje automático con scikit-learn y TensorFlow (pedregosa et al, 2011; Abadi et al, 2016). R es una herramienta poderosa para estadística y visualización con bibliotecas como ggplot2 y dplyr, pero no se usa tan ampliamente (Wickham et al, 2019). A pesar de ser reconocida por su competencia en cálculos numéricos intensivos y bibliotecas como jump para optimización (Dunning et al, 2017), julia aún no ha alcanzado la etapa de madurez y diversidad que se encuentra en el ecosistema de Python.

Lenguajes de programación	Visualización de gráficos	Machine Learning	Desarrollo web
R	ggplot2 plotly lattice ggvis Highcharter leaflet Esquisse	Caret RandomFores e1071 glmnet xgboost	Shiny Plumber Rook Rserve Httpuv fiery RestRserve OpenCPU
Phvton	Matplotlib Seaborn Plotly Bokeh Altair Pygal Pandas Plotnine	Numpy Pandas Matplotlib SciPy Scikit-learn TensorFlow Keras Pytorch Theano Scrapy	Django Flask PastAPI Tornado Pyramid Bottle Falcon web2py CherryPy Hug Sanic TurboGears Dash Aiohttp Quart
Julia	Plots Makie Gadfly VegaLite Gtk	Sparks Flux scikilearn. jl Mlbase TensorFlow Mocha Strada	Ginie HTTP Mux WebSockets Mustache Gumbo Bukdu LombScargle LightXML JSON LibPQ SQLite DataFrames

4. COMUNIDAD Y SOPORTE: ANALIZANDO EL APOYO EN R, JULIA Y PYTHON

La comunidad y el soporte son factores clave a la hora de elegir un lenguaje de programación, especialmente en áreas como análisis de datos y desarrollo web. Julia, R y Python, tienen sus propias fortalezas y características únicas en términos de la comunidad y el soporte que brindan.

Sin duda, uno de los lenguajes más utilizados es Python, que también cuenta con una comunidad bastante grande. Numerosos recursos, desde foros en línea y grupos de discusión hasta tutoriales y cursos en línea, han sido generados por la adopción masiva de Python en diversas industrias. Por ejemplo, Stack Overflow tiene una colección considerable de preguntas y respuestas relacionadas con Python, lo que hace que sea más fácil encontrar problemas comunes (Vasilescu et al., 2013). Python Software Foundation y conferencias como PyCon fomentan una comunidad que avanza continuamente en el desarrollo del lenguaje y las mejoras de la biblioteca.

También existe una fuerte comunidad para R, particularmente en los ámbitos académico y de investigación. El Comprehensive R Archive Network (CRAN) es un repositorio centralizado que proporciona una multitud de paquetes desarrollados por la comunidad para casi cualquier tipo de análisis estadístico y visualización de datos (Hornik, 2012). El entorno para la colaboración y el intercambio de conocimientos lo proporciona la R Foundation y conferencias como UseR. La comunidad R es conocida por ser acogedora y cooperativa, lo cual resulta bastante útil para nuevos usuarios y desarrolladores.

Aunque Julia es más nueva que Python y R, está ganando popularidad rápidamente, la comunidad de Julia es muy activa e incluye científicos, científicos de datos y desarrolladores que contribuyen periódicamente al lenguaje y sus paquetes. La plataforma JuliaHub y el repositorio de paquetes JuliaRegistries son recursos clave centrados en el desarrollo comunitario (Besançon et al., 2017).

Eventos como JuliaCon y las comunidades en línea Discourse y GitHub son importantes para apoyar y colaborar entre los usuarios de Julia.

Según la clasificación de PYPL, Python ocupa el primer lugar en popularidad, R el sexto y Julia el 23 (pypl.github.io, 2025). Python también encabeza la clasificación de Tiobe, seguido de R en el puesto 14 y Julia en el 31 (tiobe.com, 2025). De manera similar, en el popular sitio web Stack Overflow, Python encabeza la lista en términos de popularidad, superando con creces a Julia y R. Esta tendencia también se refleja en el sitio web de RedMonk (Stack Overflow, 2024; O'Grady, 2024). Estas clasificaciones resaltan el dominio de Python como el más preferido y ampliamente utilizado de los tres lenguajes, distinguiéndose por su versatilidad, vasta comunidad y ricos recursos (Figura 1).

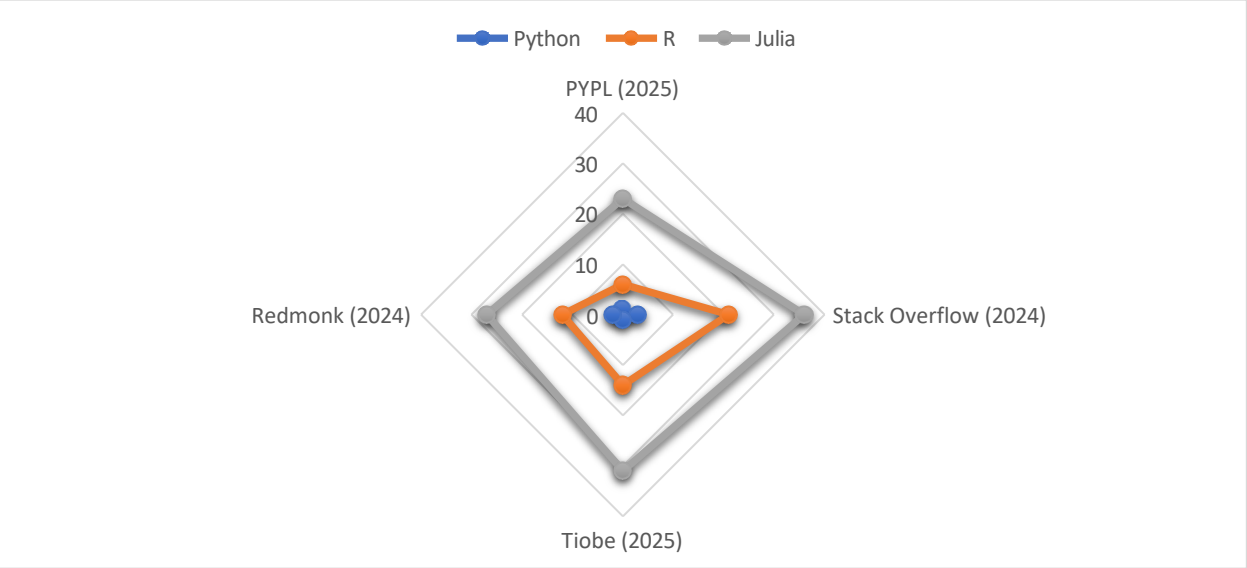


Figura 1. Orden de popularidad de cada lenguaje de programación, basado en datos de PYPL, TIOBE, Stack Overflow y RedMonk.

5. EL DESAFÍO DE LA VELOCIDAD: UN CARA A CARA ENTRE R, JULIA Y PYTHON

Como parte de una revisión sobre las ventajas y desventajas de los lenguajes de programación Python, Julia y R, orientada a la selección de la plataforma más adecuada para un desarrollo computacional, se presentan en este trabajo datos comparativos de velocidad de procesamiento. Esta información contribuye a la validación del proyecto de maestría titulado "Diseño y desarrollo de una plataforma web para aplicación en la técnica de espectroscopia infrarroja", se llevaron a cabo varias pruebas para evaluar los tiempos de respuesta de tres lenguajes de programación: R, Julia y Python. El objetivo de estas pruebas y los resultados obtenidos se detallan a continuación:

• **Agregación de dataframes:** Esta prueba evalúa la eficiencia y flexibilidad de cada software en el manejo de conjuntos de datos estructurados. Esta prueba nos permite analizar la capacidad de cada software para realizar operaciones como la suma, el promedio y la agrupación de datos en dataframes, esta prueba arroja información valiosa sobre su idoneidad para tareas de análisis de datos y ciencia de datos.

• **Desempeño sobre matrices:** Aquí se evalúa la eficiencia y velocidad con la que cada software puede manipular operaciones matriciales. Esta prueba nos proporcionaría información crucial sobre cómo cada software maneja tareas que requieren un procesamiento intensivo de datos estructurados en forma de matrices, como el análisis numérico, la simulación y la computación científica. Para esta evaluación se realizarán dos pruebas:

- **Modificación de elementos en una matriz:** A través de esta prueba obtenemos información sobre la capacidad de cada software para manipular y actualizar matrices de manera eficiente, lo que permite determinar cuál software es más adecuado para aplicaciones que requieren un procesamiento dinámico y ágil de datos en forma de matrices, como la optimización, la simulación y la manipulación de imágenes.
- **Operaciones con matrices:** Esta prueba facilita la comparación del rendimiento computacional, eficiencia en el uso de recursos y habilidad para paralelizar en tareas numéricas exigentes.

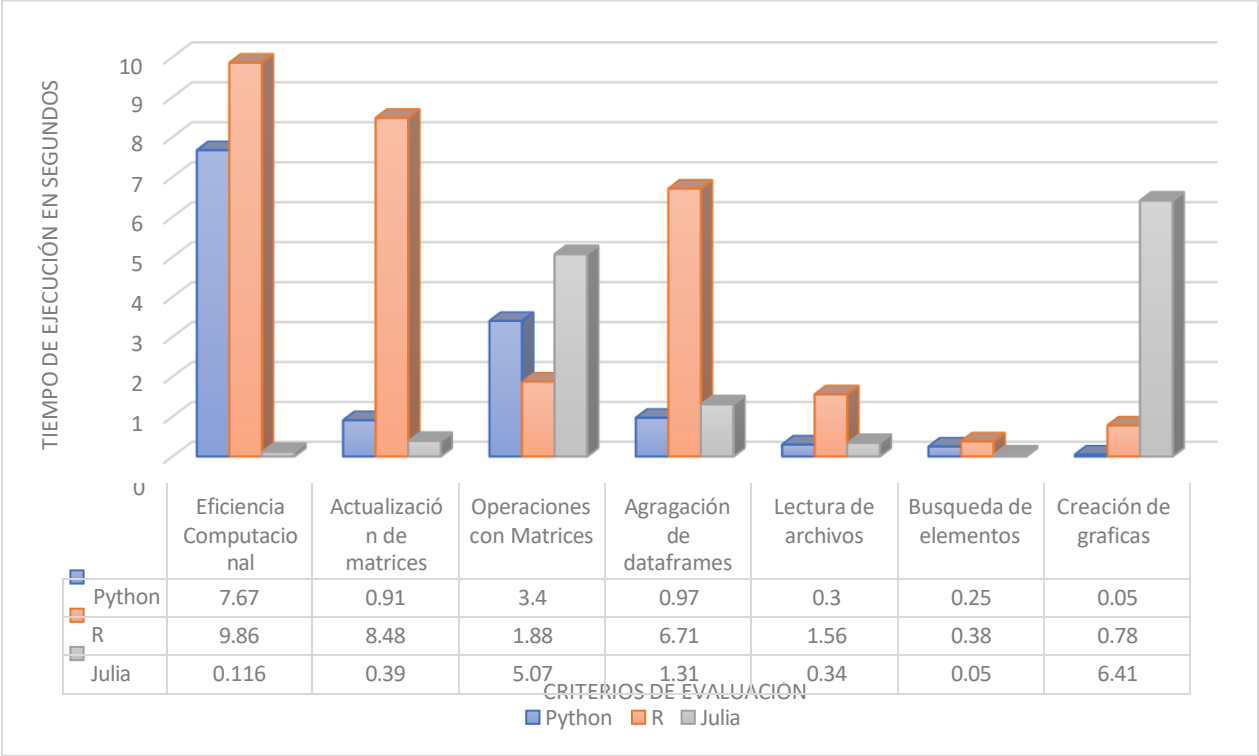
• **Creación de gráficas simples:** Se utiliza para evaluar la facilidad de uso y la eficacia con la que cada software puede generar visualizaciones básicas de datos. Esta prueba nos permitiría determinar qué software ofrece las herramientas más intuitivas y eficientes para crear gráficas simples, como diagramas de barras, gráficos de líneas y gráficos de dispersión. Además, nos ayudaría a identificar la rapidez con la que se puede generar y personalizar estas gráficas, lo que es fundamental para el análisis exploratorio de datos y la comunicación efectiva de resultados.

• **Eficiencia computacional:** Aquí se evalúa el rendimiento y la capacidad de cada software para realizar operaciones computacionales de manera rápida y eficiente. Esta prueba permite medir y comparar aspectos como el tiempo de ejecución, el uso de recursos del sistema y la escalabilidad, lo que proporciona una comprensión clara de cómo cada software maneja cargas de trabajo intensivas.

• **Búsqueda de elementos:** La finalidad de esta prueba es evaluar la eficiencia y la precisión con la que cada software puede encontrar elementos específicos dentro de conjuntos de datos lo que permite medir aspectos como el tiempo de búsqueda, la complejidad del algoritmo utilizado y la capacidad para manejar grandes volúmenes de datos.

• **Lectura de archivos:** Evalúa la eficiencia y la capacidad de cada software para procesar y manejar diferentes tipos de archivos de datos, en esta parte se mide el tiempo de lectura, la compatibilidad con diferentes formatos de archivo y la capacidad para manejar archivos de gran tamaño. La eficiencia en la lectura de archivos es esencial en muchas aplicaciones, como la importación de datos en análisis de datos, procesamiento de texto y manejo de archivos multimedia, lo que hace que esta prueba sea crítica para evaluar la utilidad y el rendimiento general de cada software.

Para cada una de las pruebas, se realizaron 100 ejecuciones por lenguaje de programación, registrándose los tiempos de ejecución correspondientes, se promediaron los tiempos de cada una de las pruebas, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 2.



	Eficiencia Computacional	Actualización de matrices	Operaciones con Matrices	Agragación de dataframes	Lectura de archivos	Busqueda de elementos	Creación de graficas
Python	7.67	0.91	3.4	0.97	0.3	0.25	0.05
R	9.86	8.48	1.88	6.71	1.56	0.38	0.78
Julia	0.116	0.39	5.07	1.31	0.34	0.05	6.41

Figura 2. Tiempo promedio de ejecución de las pruebas, expresado en segundos, para cada lenguaje.

Julia se distingue por su alta eficiencia en tareas computacionales intensivas y en operaciones de búsqueda, mientras que Python muestra un mejor desempeño en la creación de gráficas y la agregación de dataframes, en contraste, R presenta un rendimiento significativamente inferior en la mayoría de las pruebas. El análisis de los tiempos promedio de ejecución confirma que Python y Julia ofrecen un nivel de eficiencia muy similar, superando ampliamente a R en términos generales (Figura 3).

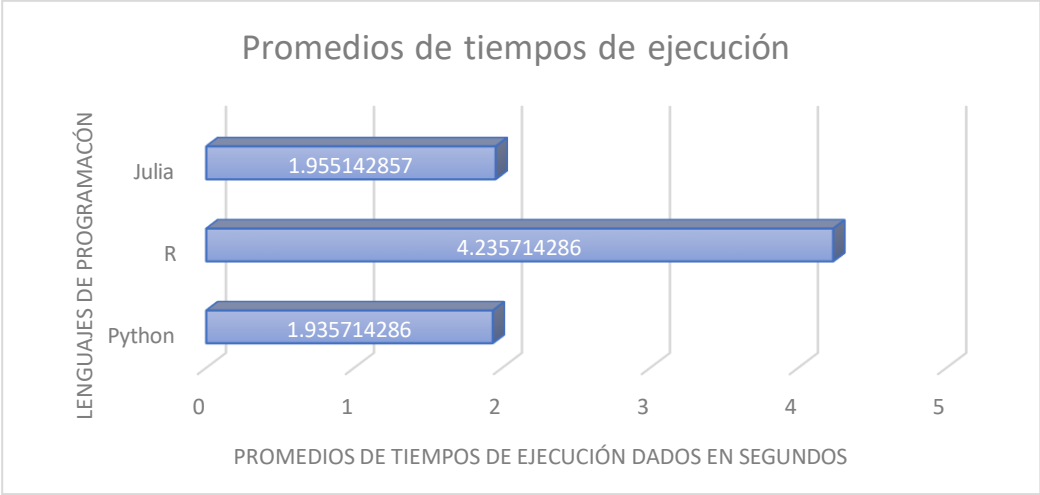


Figura 2. Promedios de tiempos de ejecución de las pruebas para cada lenguaje.

Aunque las pruebas reflejan una diferencia mínima en eficiencia entre Julia y Python, al considerar factores como el soporte comunitario y la disponibilidad de bibliotecas, Python se posiciona como la opción más sólida, su combinación de velocidad, amplia adopción y ecosistema robusto lo convierte en una de las herramientas más eficaces y preferidas por los desarrolladores, a pesar del crecimiento constante de las comunidades en torno a Julia y R.

6. PROPIEDAD INTELECTUAL Y LICENCIAS DE SOFTWARE EN R, JULIA Y PYTHON

La elección de un lenguaje de programación no se basa sólo en factores técnicos como el rendimiento, la facilidad de uso o la compatibilidad con otras herramientas y sistemas, sino también en las ramificaciones éticas y legales de su uso. Las licencias desempeñan un papel fundamental a este respecto, ya que definen los términos bajo los cuales el software puede utilizarse, modificarse y distribuirse. Las licencias pueden variar desde extremadamente restrictivas, que restringen el uso y la modificación del software, hasta extremadamente permisivas, que otorgan a los desarrolladores y usuarios una gran libertad, (Raymond, 2001).

El software de libre distribución, a menudo llamado software libre o de código abierto, se caracteriza por licencias que permiten a los usuarios no solo utilizar el software, sino también acceder al código fuente, modificarlo y redistribuirlo, esto promueve la transparencia, la colaboración y la innovación, ya que permite a una comunidad global de desarrolladores contribuir al desarrollo y mejora del software, (Stallman, 2021). La revisión de las licencias de software es, por tanto, un paso fundamental para cualquier organización o individuo que desee utilizar, desarrollar o contribuir a proyectos de software, asegurando que sus derechos y responsabilidades están claramente definidos y alineados con sus objetivos y valores, (Rosen, 2005).

Las licencias de software pueden tener implicaciones importantes para la propiedad intelectual. Un entendimiento claro de estas licencias ayuda a prevenir conflictos legales y asegura que los derechos de los autores y contribuyentes del software son respetados, (Fitzgerald y Bassett, 2003).

6.1 R

R es distribuido bajo la Licencia Pública General GNU (GPL), una licencia de software libre que permite a los usuarios ejecutar, examinar, compartir y alterar el software. La GPL estipula que cualquier trabajo derivado del software también debe distribuirse bajo la misma licencia, fomentando un entorno colaborativo y abriendo oportunidades para el desarrollo y mejoras de herramientas y paquetes (Free Program Foundation, 2007). Esta característica de la GPL es fundamental para mantener la libertad del software a lo largo de su ciclo de vida y asegurar que las mejoras y modificaciones beneficien a toda la comunidad de usuarios y desarrolladores (DiBona et al., 1999)

La naturaleza colaborativa de R bajo la GPL ha sido un factor clave en su adopción y mayor desarrollo en las comunidades científica y académica. La capacidad de modificar y mejorar el código permite a investigadores y estadísticos adaptar R a sus necesidades específicas, contribuyendo así al desarrollo de nuevos paquetes y extensiones que mejoran el ecosistema de R (Ihaka y Gentleman, 1996). Además, esta licencia promueve la transparencia en la investigación científica, ya que otros investigadores pueden revisar y reproducir los análisis y métodos. Esto es esencial para la reproducibilidad y validación de los resultados (Peng, 2011).

La amplia colección de paquetes disponibles en CRAN (Comprehensive R Archive Network), que facilita el intercambio y la distribución de herramientas desarrolladas por la comunidad, es otro ejemplo de cómo la GPL ha impactado el crecimiento de R (Gentleman et al., 2004).

6.2 JULIA

Julia usa la licencia MIT. Se trata de una licencia de software libre permisiva que permite a los usuarios hacer casi cualquier cosa con el código, siempre que se incluya una copia del aviso de derechos de autor y la licencia original. La licencia MIT es menos restrictiva que la GPL, lo que facilita la integración de Julia en otros proyectos de software y permite que más desarrolladores contribuyan al lenguaje sin preocuparse por las restricciones de la licencia (Licencia MIT, 1988). Esta flexibilidad ha llevado al rápido aumento de la popularidad de Julia, especialmente en campos como la ciencia de datos, la computación numérica y la inteligencia artificial (Bezanson et al., 2017).

La licencia MIT permite a los desarrolladores utilizar el código de Julia en sus propios proyectos sin tener que publicar el código fuente de esos proyectos, lo que podría ser un factor crucial para las empresas y los desarrolladores que buscan maximizar las capacidades de Julia sin comprometer su propiedad intelectual (Bezanson, Edelman, Karpinski, y Shah, 2017). La claridad y simplicidad de la licencia del MIT reducen las barreras legales y administrativas para la adopción y el desarrollo de Julia, fomentando una comunidad activa y en expansión (Perkel, 2019).

6.3 PYTHON

Python también se distribuye bajo la licencia Python Software Foundation License (PSF), que es similar a la licencia MIT. Esta licencia es permisiva y permite a los usuarios utilizar, modificar y redistribuir el software libremente. La flexibilidad de la licencia de Python ha contribuido a su amplia adopción y a la creación de una vasta cantidad de bibliotecas y frameworks de terceros (Python Software Foundation, 2001). Esta permisividad ha sido clave para que Python se convierta en uno de los lenguajes más populares y versátiles en la programación moderna (Van Rossum & Drake, 2009).

La licencia PSF permite a los desarrolladores integrar Python en aplicaciones comerciales sin tener que abrir el código fuente de la aplicación, lo que aumenta la aceptación de Python tanto en el mundo académico como en la industria (Lutz, 2013). La amplia disponibilidad de bibliotecas y marcos como Django para el desarrollo web, NumPy y SciPy para la informática científica y TensorFlow para el aprendizaje automático refleja la solidez del ecosistema Python, posible gracias a la naturaleza permisiva de la licencia (Ascher y Dubois, 1996).

Las diferencias en las licencias de estos lenguajes pueden influir en la elección de los desarrolladores y organizaciones en función de sus necesidades específicas y consideraciones legales. Por ejemplo, las empresas que desarrollan software propietario pueden preferir lenguajes con licencias permisivas como Julia y Python para evitar las obligaciones de compartir sus modificaciones bajo la misma licencia. Por otro lado, la comunidad académica y de investigación podría inclinarse hacia R debido a su enfoque en el software libre y abierto.

Las licencias de software de R, Julia y Python juegan un papel crucial en el desarrollo y adopción de estos lenguajes, afectando tanto a la comunidad de desarrolladores como a los usuarios finales. Al elegir un lenguaje de programación, es esencial considerar no solo las capacidades técnicas, sino también las implicaciones de propiedad intelectual y licencias que pueden influir en la viabilidad a largo plazo de los proyectos.

7. CONCLUSIÓN

En la batalla por el dominio en ciencia de datos y desarrollo, cada uno de los lenguajes R, Julia y Python tiene sus fortalezas y nichos específicos. R, con su fuerte enfoque en la estadística y el análisis de datos, se destaca en la academia y la investigación científica. Julia, con su rendimiento superior en cálculos numéricos y facilidad de uso, está ganando terreno rápidamente en la comunidad científica y de ingeniería.

Sin embargo, cuando se trata de desarrollo web, Python emerge indiscutiblemente como el líder. Su licencia permisiva, combinada con una vasta y robusta colección de bibliotecas y frameworks como Django y Flask, ha convertido a Python en la opción predilecta para desarrolladores de todo el mundo. La versatilidad de Python no solo lo hace ideal para la creación de aplicaciones web eficientes y escalables, sino que también permite una integración fluida con proyectos de ciencia de datos y aprendizaje automático, creando un ecosistema unificado y poderoso.

Python no es solo una herramienta, es el motor que impulsa la innovación en el desarrollo web moderno. Su capacidad para adaptarse a las demandas cambiantes del desarrollo tecnológico y su comunidad activa y en expansión aseguran que Python seguirá dominando en el futuro cercano. La elección es clara: para aquellos que buscan construir el próximo gran avance en el desarrollo web, Python es el camino para seguir. ¡El futuro del desarrollo está escrito en Python!

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., Kudlur, M., Levenberg, J., Monga, R., Moore, S., Murray, D. G., Steiner, B., Tucker, P., Vasudevan, V., Warden, P., . . . Zheng, X. (2016). TensorFlow: a system for large-scale machine learning. Operating Systems Design And Implementation, 265-283. https://doi.org/10.5555/3026877.3026899
- Ascher, D., & Dubois, P. F. (1996). "Numerical Python." Lawrence Livermore National Laboratory.
- Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S., & Shah, V. B. (2017). "Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing." SIAM Review, 59(1), 65-98.
- Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D. M., Wu, J., Winter, C., . . . Amodei, D. (2020). Language Models are Few-Shot Learners. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2005.14165.
- DiBona, C., Ockman, S., & Stone, M. (1999). Open sources: Voices from the Open Source Revolution. O'Reilly Media, Inc.
- Dunning, I., Huchette, J., & Lubin, M. (2017). JuMP: A Modeling Language for Mathematical Optimization. SIAM Review, 59(2), 295-320. https://doi.org/10.1137/15m1020575
- Eschle, J., Gal, T., Giordano, M., Gras, P., Hegner, B., Heinrich, L., Acosta, U. H., Kluth, S., Ling, J., Mato, P., Mikhasenko, M., Briceño, A. M., Pivarski, J., Samaras-Tsakiris, K., Schulz, O., Stewart, G. . . A., Strube, J., & Vassilev, V. (2023). Potential of the Julia Programming Language for High Energy Physics Computing. Computing And Software For Big Science, 7(1). https://doi.org/10.1007/s41781-023-00104-x
- Fitzgerald, B., & Bassett, G. (2003). Legal Issues Relating to Free and Open Source Software. En Queensland University of Technology eBooks (p. 11). https://acuresearchbank.acu.edu.au/item/86381/legal-issues-relating-to-free-and-open-source-software
- Free software foundation. (2007). The GNU General Public License. https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html
- Gentleman, R. C., Carey, V. J., Bates, D. M., Bolstad, B., Dettling, M., Dudoit, S., Ellis, B.,

Gautier, L., Ge, Y., Gentry, J., Hornik, K., Hothorn, T., Huber, W., Iacus, S., Irizarry, R., Leisch, F., Li, C., Maechler, M., Rossini, A. J., . . . Zhang, J. (2004). Bioconductor: open software development for computational biology and bioinformatics. GenomeBiology.com, 5(10), R80. https://doi.org/10.1186/gb-2004-5-10-r80

- Grinberg, M. (2018). Flask Web Development: Developing Web Applications with Python. O'Reilly Media.
- Holovaty, A., & Kaplan-Moss, J. (2009). The Definitive Guide to Django: Web Development Done Right (Expert's Voice in Web Development) (2.a ed.). Apress.
- Holovaty, A., & Kaplan-Moss, J. (2013). The Django Book Release 2.0. https://readthedocs.org/projects/djangobook/downloads/pdf/latest/
- Hornik, K. (2012). The comprehensive R Archive Network. Wiley Interdisciplinary Reviews. Computational Statistics, 4(4), 394-398. https://doi.org/10.1002/wics.1212
- Hunter, J. D. (2007c). MatPlotLib: a 2D Graphics environment. Computing In Science & Engineering, 9(3), 90-95. https://doi.org/10.1109/mcse.2007.55
- Ihaka, R., & Gentleman, R. (1996). R: A Language for Data Analysis and Graphics. Journal Of Computational And Graphical Statistics, 5(3), 299-314. https://doi.org/10.1080/10618600.1996.10474713
- Julia Documentation · The Julia Language. (2024). https://docs.julialang.org/en/v1/
- Líderes en formación tecnológica, reskilling y upskilling | OpenWebinars. (2024). OpenWebinars.net. https://openwebinars.net/blog/herramientas-y-librerias-de-machine-learning-en-python/
- Los mejores paquetes de visualización para R en 2023. (2023). BibTeX. https://bibtex.eu/es/blog/top-visualization-packages-for-r-in-2023/
- Lutz, M. (2013). "Learning Python." O'Reilly Media, Inc.
- McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. Proceedings Of The Python In Science Conferences. https://doi.org/10.25080/majora-92bf1922-00a
- MIT License. (1988). Retrieved from https://opensource.org/licenses/MIT
- Nowacki, A. (2020). SeisModels.jl: A Julia package for models of the Earth's interior. The Journal Of Open Source Software, 5(47), 2043. https://doi.org/10.21105/joss.02043
- O'Grady, S. (2024). The RedMonk Programming Language Rankings: June 2024. https://redmonk.com/sogrady/2024/09/12/language-rankings-6-24/
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2012). Scikit-learn: Machine Learning in Python. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.1201.0490
- Perkel, J. M. (2019). "Why Julia is Slowly Catching On." Nature, 572, 141-142.
- PYPL PopularitY of Programming Language index. (2025). https://pypl.github.io/PYPL.html
- Python Software Foundation. (2001). "Python Software Foundation License." Retrieved from https://www.python.org/psf/license/
- R: The R Foundation. (s. f.). https://www.r-project.org/foundation/
- Raymond, E. S. (2001). The Cathedral & the Bazaar: Musings on Linux and Open Source by an Accidental Revolutionary. «O'Reilly Media, Inc.»
- Roger D.Peng. Investigación reproducible en ciencias computacionales. Science 334 , 1226-1227 (2011). DOI: 10.1126/science.1213847
- Rosen, L. E. (2005). Open source licensing: Software Freedom and Intellectual Property Law. Prentice Hall.
- Stack overflow. (s. f.). https://survey.stackoverflow.co/
- Stallman, R. (2021). ¿Qué es el Software Libre? Free Software Foundation. https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html
- Streamlit. A faster way to build and share data apps, (2024). https://streamlit.io/
- Tierney, L. (2012). The R Statistical Computing environment. En Lecture notes in statistics

(pp. 435-447). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3520-4_41

- TIOBE Index - TIOBE. (2025). TIOBE. https://www.tiobe.com/tiobe-index/
- Van Rossum, G., y Drake, F. L. (2009). "The Python Language Reference Manual." Network Theory Ltd.
- Van Rossum, G., y Drake, F. L., Jr. (2011). An Introduction to Python. Network Theory. ISBN 978-1906966133
- Vasilescu, B., Serebrenik, A., y Devanbu, P. (2013). StackOverflow and GitHub: Associations between software development and crowdsourced knowledge. In 2013 International Conference on Social Computing (pp. 188-195). IEEE. https://doi.org/10.1109/SocialCom.2013.35
- Waskom, M. (2021b). seaborn: statistical data visualization. Journal Of Open Source Software, 6(60), 3021. https://doi.org/10.21105/joss.03021
- Wickham, H. (2016). ggplot2. En Use R! https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4
- Wickham, H. (2021). Tidy Messy Data [R Package TidYR Version 1.1.3]. CRAN. http://ftp.udc.es/CRAN/web/packages/tidyr/index.html
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., . . . Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. Journal Of Open Source Software, 4(43), 1686. https://doi.org/10.21105/joss.01686
- Wickham, H., François, R., Henry, L., y Müller, K. (2021). A Grammar of Data Manipulation [R Package DPLyR Version 1.0.7]. CRAN http://cran.salud.gob.sv/web/packages/dplyr/index.html

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

COMPUTACIÓN E INFORMÁTICA
Recibido 2 Sep. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*
Aceptado 25 Nov. 2025

Entrenamiento de una red neuronal de seguimiento de señales: un enfoque metaheurístico mediante optimización por enjambre de partículas

Training a Signal-Tracking Neural Network: A Metaheuristic Approach Using Particle Swarm Optimization

Alma Aide Sánchez Ramírez

Alvaro Anzueto Ríos[1]
aanzuetor@ipn.mx

[1] Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del **IPN**.

RESUMEN
A medida que los sistemas complejos y no lineales aumentan su cantidad de datos; como en la actualidad con el uso de aplicaciones que registran posiciones y otras actividades que desarrollamos diariamente, los sistemas inteligentes deben aprender a partir de grandes volúmenes de datos y adaptarse a entornos cambiantes. En muchos casos la optimización basada en métodos clásicos resulta insuficiente, por lo que los algoritmos metaheurísticos se han vuelto una herramienta para la optimización de modelos complejos, con aplicaciones que van desde el diseño de redes neuronales, sistemas de control y el ajuste de modelos predictivos. Por esta razón, resulta relevante evaluar el desempeño de estos algoritmos en diferentes campos. En este trabajo se aborda el entrenamiento de redes neuronales, para lo cual se presenta una comparación entre dos métodos de entrenamiento de tipo forward propagation para la para la tarea de seguimiento de señales temporales, con el objetivo de ajustar sus parámetros sinápticos y que la neurona intente aproximarse a una señal de referencia. Como alternativa al entrenamiento basado en el algoritmo de Backpropagation, que utiliza el descenso del gradiente para minimizar el error cuadrático medio (MSE), se implementa el algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), una técnica de búsqueda global que opera sin necesidad de derivadas y realiza una exploración simultánea del espacio de solución. Para evaluar y comparar el desempeño de ambos métodos, se realizaron 30 ejecuciones para cada algoritmo. El rendimiento se midió con el MSE final, la tasa de éxito (definida como un MSE inferior a 0.005) y el tiempo de cómputo total. Adicionalmente, se analiza la superficie de solución generada por la red neuronal, representando la función de costo en términos de dos pesos seleccionados, lo cual permite ilustrar la presencia de múltiples óptimos locales y su impacto en la eficacia de cada algoritmo. Los resultados obtenidos demuestran que, aunque Backpropagation tiende a converger rápidamente, es susceptible a mínimos locales, mientras que PSO mostró mayor estabilidad frente a la topología no convexa de la superficie de solución, logrando convergencia hacia regiones de bajo error en la mayoría de los casos evaluados. Las observaciones realizadas permiten discutir las ventajas y limitaciones de cada enfoque en contextos donde las funciones objetivo son no diferenciables

Palabras clave: Redes neuronales artificiales, optimización de enjambre de partículas, Backpropagation, Seguimiento de señales, aproximación de funciones, optimización metaheurística, superficie de solución**.**

ABSTRACT
As complex, nonlinear systems generate increasing amounts of data—for instance, through modern applications that continuously record positions and other daily activities—intelligent systems must learn from large data volumes and adapt to changing environments. In many cases, optimization based on classical methods becomes insufficient, so metaheuristic algorithms have emerged as powerful tools for optimizing complex models, with applications ranging from neural network design and control systems to the fine-tuning of predictive models. For this reason, it is important to assess the performance of these algorithms in different domains. In this work, we focus on the training of neural networks and present a comparison between two forward-propagation training methods for the task of tracking temporal signals, with the goal of adjusting their synaptic parameters so that the neuron attempts to approximate a reference signal. As an alternative to training based on the Backpropagation algorithm, which uses gradient descent to minimize the mean squared error (MSE), we implement the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, a global search technique that operates without requiring derivatives and performs a simultaneous exploration of the solution space. To evaluate and compare the performance of both methods, 30 runs were carried out for each algorithm. Performance was measured using the final MSE, the success rate (defined as an MSE below 0.005), and the total computation time. Additionally, the solution surface generated by

the neural network is analyzed by representing the cost function in terms of two selected weights, which makes it possible to illustrate the presence of multiple local optima and their impact on the effectiveness of each algorithm. The results show that, although Backpropagation tends to converge quickly, it is susceptible to local minima, whereas PSO exhibited greater stability with respect to the non-convex topology of the solution surface, achieving convergence toward low-error regions in most of the evaluated cases. These observations support a discussion of the advantages and limitations of each approach in contexts where the objective functions are non-differentiable.

Keywords: Artificial Neural Networks, Particle Swarm Optimization, Backpropagation, Signal Tracking, Function Approximation, Metaheuristic Optimization, Error Landscape.

1. INTRODUCCION

La capacidad de aproximar funciones y seguir señales dinámicas ha representado un desafío central en áreas tan diversas como la ingeniería de control, las telecomunicaciones y el procesamiento de señales biomédicas (Ljung, 1999). En este contexto, las Redes Neuronales Artificiales (RNA) han demostrado ser herramientas, capaces de capturar relaciones complejas y no lineales a partir de datos experimentales (Goodfellow et al., 2016; Hagan et al., 2014).

El enfoque más utilizado para entrenar este tipo de redes es el algoritmo de Backpropagation, popularizado por Rumelhart y colaboradores en 1986. Este método, basado en el descenso de gradiente, ajusta los pesos de la red minimizando iterativamente el error. Sin embargo, su eficacia depende de la naturaleza de la superficie de solución, una superficie multidimensional definida por los parámetros de la red. En superficies de solución no convexas, que son comunes en problemas no triviales, los métodos basados en gradiente corren el riesgo de converger a mínimos locales, como bien señalan investigaciones previas (Choromanska et al., 2015)), lo que resulta en un rendimiento subóptimo del modelo.

Frente a esta limitación, han surgido enfoques de optimización alternativos, entre las cuales destacan los algoritmos metaheurísticos, que han sido aplicados con éxito al entrenamiento de redes neuronales (Yudong & Lenan, 2015), ofrecen una estrategia de búsqueda global que no depende de la información del gradiente. Entre ellos, la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), desarrollada por Kennedy y Eberhart (1995), opera con una población de soluciones candidatas (partículas) que exploran el espacio de búsqueda de manera colaborativa. Cada partícula ajusta su trayectoria combinando su propia experiencia con la del mejor individuo del enjambre, equilibrando así la exploración de nuevas áreas del espacio de búsqueda con la explotación de regiones prometedoras. Esta naturaleza estocástica y poblacional le permite escapar de mínimos locales y alcanzar soluciones más robustas (Engelbrecht, 2007).

Este trabajo aborda el entrenamiento de una red neuronal con el algoritmo de PSO para una tarea de seguimiento de señales, con el objetivo de responder las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Puede el algoritmo PSO entrenar de manera efectiva la arquitectura de red neuronal propuesta para esta aplicación?
2. ¿Cómo se compara su rendimiento, en términos de precisión, robustez y velocidad de convergencia, con el enfoque clásico de Backpropagation?

Para responder estas preguntas, se llevó a cabo un análisis comparativo, en una red neuronal con arquitectura 1-2-1 fue entrenada con ambos algoritmos, evaluando su desempeño a través de múltiples ejecuciones considerando tanto métricas cuantitativas como el comportamiento dinámico de los algoritmos.

La estructura del artículo es la siguiente: la sección 2 describe la arquitectura de la red, los algoritmos y la configuración experimental. La sección 3 presenta los hallazgos empíricos, mientras que la sección 4 se dedica a la interpretación y discusión de los resultados. El artículo concluye en la sección 5 con un resumen de las conclusiones del estudio.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describe la estrategia experimental diseñada para comparar los algoritmos de entrenamiento. Se presenta la arquitectura de la red neuronal, la formulación del problema de optimización, los algoritmos de entrenamiento empleados y los parámetros que guiaron la configuración de las simulaciones.

2.1 Arquitectura de la Red Neuronal

Para el desarrollo del estudio se emplea una red neuronal artificial de tipo prealimentada (feed-forward) con una arquitectura 1-2-1, compuesta por una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. La capa de entrada consta de una única neurona que recibe el valor escalar *p*. La capa oculta contiene dos neuronas, y la capa de salida una sola neurona que produce la aproximación final, *a*. Esta arquitectura, aunque simple, es capaz de aproximar cualquier funcion continua con un grado arbitrario de precisión, un principio conocido como el teorema de aproximación universal (Hornik et al., 1989).

La función de activación para las neuronas de la capa oculta es la sigmoide logística (logsig), definida como:

$$f^1(n) = \frac{1}{1+e^{-n}} \qquad (1)$$

donde *n* es la entrada neta a la neurona. Esta función no lineal es fundamental para la capacidad de la red de aprender relaciones complejas (Hagan et al., 2014)

La capa de salida utiliza una función de activación lineal (*purelin*), que simplemente trasmite su entrada neta sin alteración:

$$f^2(n) = n \qquad (2)$$

Esta elección es estándar para tareas de regresión donde la salida no esta acotada a un rango especifico. La salida completa de la red, $a(p)$, es una composición de estas funciones, tal como se describe en Hagan et al. (2014, Capítulo 11).

2.2 Formulación del Problema de Optimización

El objetivo es entrenar la red para que su salida $a(p)$ siga una señal sinusoidal de referencia, $g(p)$, definida como:

$$g(p) = 1 + \sin\left(\frac{\pi}{4}p\right) \qquad (3)$$

El proceso de entrenamiento se formula como un problema de optimización donde se busca el conjunto de parámetros de la red que minimice el error de aproximación. Todos los parámetros entrenables de la red (4 pesos y 3 polarizaciones) se consolidan en un único vector de parámetros de 7 dimensiones, θ:

$$\boldsymbol{\theta} = [w^1_{1,1}, w^1_{2,1}, b^1_1, b^1_2, w^2_{1,1}, w^2_{1,2}, b^2_1] \qquad (4)$$

La tarea consiste en encontrar el vector óptimo θ^* que reside en un espacio de búsqueda R^7

2.3 Función de Fitness: Error Cuadrático Medio (MSE)

Para cuantificar el rendimiento de un conjunto de parámetros θ dado, se utiliza el Error Cuadrático Medio (MSE) como función de fitness. El MSE es una función de perdida estándar en problemas de regresión con redes neuronales (Godfellow et al., 2016). Mide la diferencia promedio al cuadrado entre la salida deseada t_k es la salida deseada y a_k la salida real de la red para un conjunto de ***N*** puntos de entrenamiento.

$$\text{Fitness}(\boldsymbol{\theta}) = \text{MSE} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(t_k - a_k)^2 \quad (5)$$

El objetivo de los algoritmos de optimización es encontrar el vector θ^* que minimice el valor de esta función.

2.4 Algoritmos de Optimización

Se implementaron y compararon dos algoritmos de optimización con filosofías fundamentalmente distintas. El primero, *Backpropagation*, es un método basado en gradientes, mientras que el segundo, la optimización por enjambre de partículas (PSO), es un algoritmo metaheurístico sin derivadas.

2.4.1. Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)

PSO es un algoritmo metaheurístico poblacional inspirado en el comportamiento social de ciertos animales (Kennedy & Eberhart, 1995). El algoritmo mantiene una población (enjambre) de soluciones candidatas (partículas), donde la posición de cada partícula *i* corresponde a un vector de parámetros θ_i. En cada iteración *t*, la velocidad v_i y la posición θ_i de cada partícula se actualizan de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{v}_i(t+1) \quad = w\mathbf{v}_i(t) + c_1 r_1(\mathbf{pbest}_i - \boldsymbol{\theta}_i(t)) + c_2 r_2(\mathbf{gbest} - \boldsymbol{\theta}_i(t)) \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\theta}_i(t+1) \quad = \boldsymbol{\theta}_i(t) + \mathbf{v}_i(t+1) \quad (7)$$

donde *w* es el coeficiente de inercia, que modula la influencia de la velocidad anterior; c_1 es el coeficiente cognitivo, que pondera la atracción hacia la mejor solución personal de la partícula ($\boldsymbol{pbest_i}$), c_2 es el coeficiente social, que pondera la atracción hacia la mejor solución global del enjambre ($gbest$)**.** Los términos r_1, r_2 son números aleatorios en el intervalo [0,1] que introducen estocasticidad en la búsqueda. Un análisis detallado de la influencia de estos parámetros se encuentra en trabajos como el de Clerc and Kennedy (2002).

2.4.2 Retropropagación del Error (Backpropagation)

Backpropagation es un algoritmo de optimización local que implementa el **descenso de gradiente** (Rumelhart et al., 1986). Utiliza la regla de la cadena para calcular el gradiente de la función de error con respecto a cada parámetro de la red. Este gradiente indica la dirección de máximo crecimiento del error, por lo que los parámetros se actualizan en la dirección opuesta para minimizarlo. La regla de actualización para un parámetro genérico θ_j es:

$$\theta_j(t+1) = \theta_j(t) - \eta\frac{\partial \text{MSE}}{\partial \theta_j} \quad (8)$$

donde η es la tasa de aprendizaje, un hiperparámetro crítico que controla el tamaño del paso en cada iteración. El cálculo del gradiente $\frac{\partial MSE}{\partial \theta_j}$ se realiza propagando las sensibilidades del error hacia atrás, desde la capa de salida hasta la de entrada (Goodfellow et al., 2016, Capítulo 7).

2.5 Configuración Experimental

Todos los experimentos se realizaron utilizando un conjunto de datos de entrenamiento generado a partir de la función objetivo en el rango $p \in [-2,2]$ con un paso de 0.5. Para asegurar la validez estadística de los resultados, cada experimento se repitió 30 veces con inicializaciones aleatorias diferentes. Los parámetros específicos para cada algoritmo se detallan en la **Tabla 1**. El rendimiento se evaluó utilizando el MSE final, la tasa de éxito (proporción de ejecuciones con un MSE final inferior a 0.005) y el tiempo total de cómputo.

Parámetro	Símbolo / Configuración	Valor
Configuración General		
Número de Ejecuciones	–	30
Umbral de Éxito (MSE)	–	0.005
Optimizador PSO		
Número de Partículas	–	40
Número de Generaciones	–	100
Coeficiente de Inercia	w	0.6
Coeficiente Cognitivo	c_1	1.8
Coeficiente Social	c_2	1.8
Optimizador Backpropagation		
Número de Épocas	–	100
Tasa de Aprendizaje	η	0.02

Tabla 1. Parámetros de configuración para los experimentos de optimización

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los hallazgos empíricos obtenidos de la ejecución de los experimentos descritos en la metodología. Se reportan los resultados de 30 ejecuciones de PSO, evaluando la calidad de la aproximación a la señal objetivo, la convergencia del MSE, la evolución de los parámetros sinápticos y la dinámica de exploración-explotación del enjambre. Posteriormente, analiza la superficie de solución y la presencia de múltiples óptimos locales. Finalmente, se comparan PSO y Backpropagation en términos de MSE, desviación estándar, tasa de éxito y tiempo de cómputo, además de las curvas de convergencia que describen el comportamiento global de ambos algoritmos.

3.1 Análisis del Comportamiento del Optimizador PSO

El rendimiento del algoritmo PSO se evaluó a lo largo de 30 ejecuciones independientes. La **Figura 1** ilustra la capacidad de la red entrenada para aproximar la señal objetivo en tres casos representativos: la ejecución con el menor MSE final (mejor caso), la ejecución con el MSE mediano y la ejecución con el mayor MSE final (peor caso). En todos los casos, la red logra capturar la forma sinusoidal de la señal de referencia.

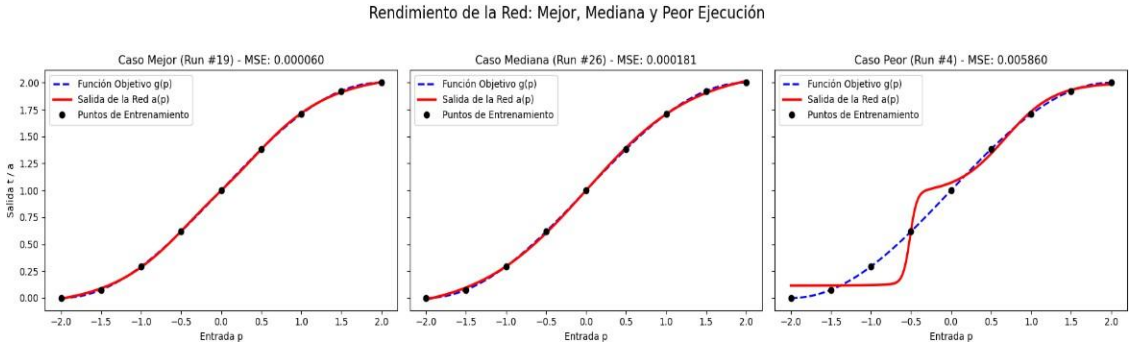


Figura 1. Comparación de la aproximación de la señal para la mejor, mediana y peor ejecución del algoritmo PSO. La línea discontinua azul representa la señal objetivo, la línea continua roja es la salida de la red y los puntos negros son los datos de entrenamiento.

El proceso de convergencia del enjambre se muestra en la **Figura 2**. La figura presenta las curvas de *fitness* (MSE) del mejor individuo a lo largo de las 100 generaciones para cada una de las 30 ejecuciones. La línea roja gruesa indica la trayectoria de convergencia promedio. Se observa una rápida disminución del error en las primeras generaciones, seguida de un ajuste más fino en las etapas posteriores.

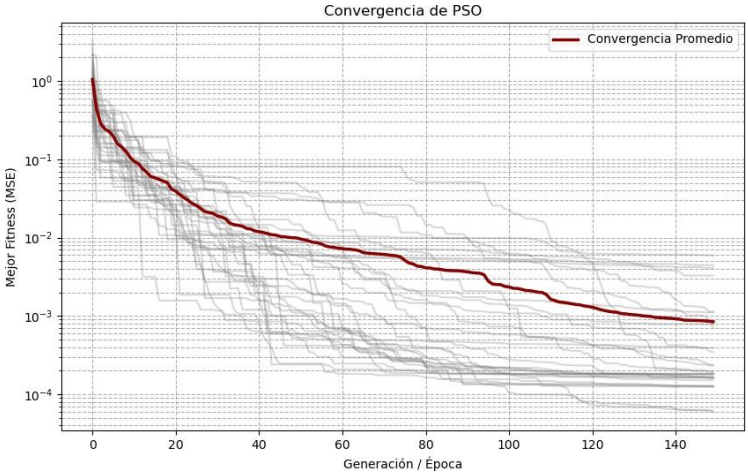


Figura 2. Curvas de convergencia de PSO para 30 ejecuciones. Cada línea representa una ejecución individual, mientras que la línea roja muestra el promedio.

Para comprender cómo el algoritmo encuentra una solución, la **Figura 3** rastrea la evolución de los siete parámetros del vector θ correspondientes a la mejor partícula global (*gbest*) durante la mejor ejecución. Se puede observar cómo los valores de los parámetros se ajustan y estabilizan a medida que avanzan las generaciones.

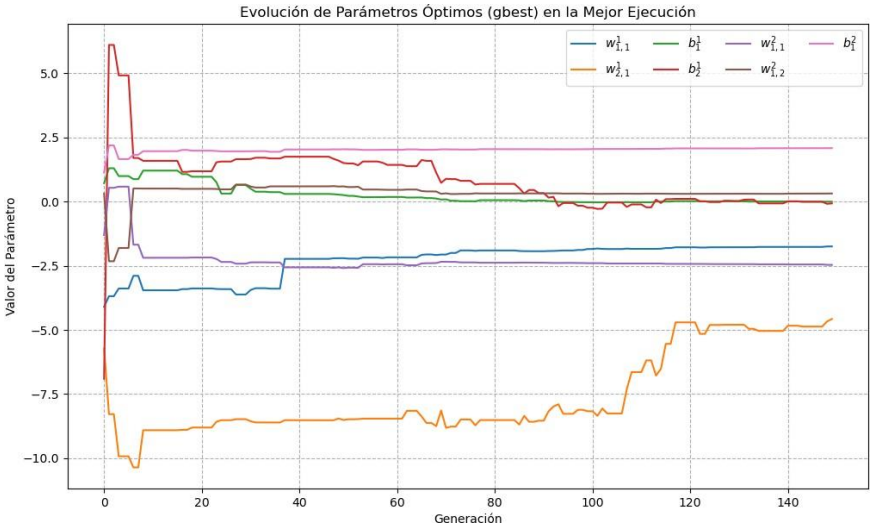


Figura 3. Evolución de los siete parámetros de la red neuronal (pesos y polarizaciones) a lo largo de las generaciones para la ejecución con el mejor rendimiento.

Finalmente, la dinámica interna del enjambre se analiza a través de la métrica de diversidad, como se muestra en la **Figura. 4.** La diversidad, medida como la desviación estándar promedio de las posiciones de las partículas, es alta en las primeras generaciones, lo que indica una fase de **exploración** del espacio de búsqueda. Posteriormente, la diversidad disminuye de manera constante, lo que significa que el enjambre converge hacia una región prometedora en una fase de **explotación.** Este equilibrio dinámico entre exploración y explotación es un comportamiento fundamental y deseable en los algoritmos de optimización poblacionales, ya que previene la convergencia prematura a soluciones subóptimas (Eiben & Smith, 2003).

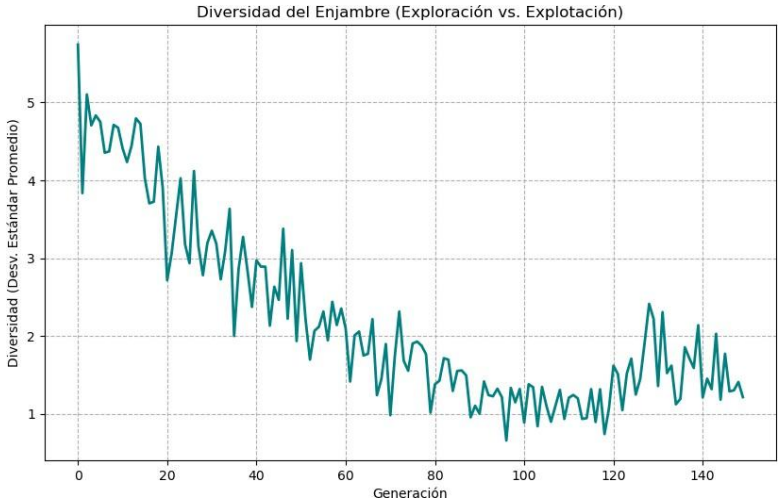


Figura 4. Diversidad del enjambre de PSO a lo largo de las generaciones. Una alta diversidad indica exploración, mientras que una baja diversidad indica explotación y convergencia.

3.2 Visualización de la superficie de solución.

Para contextualizar el desafío de optimización, se visualizó una sección transversal de la superficie de solución de 7 dimensiones. La **Figura 5** muestra el valor del MSE al variar dos de los pesos de la capa de salida ($w^2_{1,1}$ y $w^2_{1,2}$), manteniendo los otros cinco parámetros fijos en sus valores óptimos encontrados por PSO. La superficie de solución exhibe una topografía compleja y no convexa, con múltiples valles y regiones de bajo error, lo que sugiere la presencia de numerosos mínimos locales.

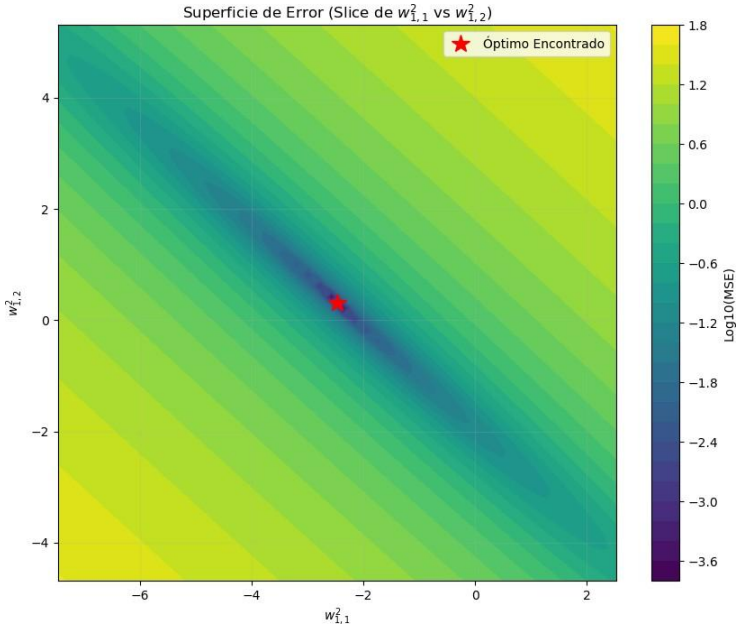


Figura 5 Visualización de una rebanada 2D de la superficie de solución Los colores más oscuros representan un MSE más bajo (mejor fitness). La estrella roja marca la ubicación de la solución óptima encontrada por PSO.

3.3 Comparativa de Rendimiento: PSO vs. Backpropagation

La comparativa directa del rendimiento entre PSO y *Backpropagation* se resume en la **Tabla 2**. Los valores representan el promedio y la desviación estándar de las 30 ejecuciones para cada algoritmo. Los resultados muestran que PSO alcanzó un MSE final promedio más bajo y con menor variabilidad (menor desviación estándar) que *Backpropagation*. Además, PSO logró una tasa de éxito del 100%, mientras que la de *Backpropagation* fue del 86.7%. En contraste, el tiempo de cómputo total para las 30 ejecuciones fue considerablemente menor para *Backpropagation*.

Métrica	PSO	Backpropagation
MSE Final Promedio	0.000378	0.003157
Desviación Estándar del MSE	0.000122	0.005118
Tasa de Éxito (%)	100.0	86.7
Tiempo de Cómputo Total (s)	10.32	1.58

Tabla 2. Resumen comparativo de rendimiento entre PSO y Backpropagation

La diferencia en la dinámica de convergencia se ilustra en la **Figura 6**. PSO muestra una **curva de aprendizaje más estable y consistente**, alcanzando un nivel de error final más bajo. Backpropagation, aunque desciende rápidamente al principio, se estanca en un nivel de error promedio más alto.

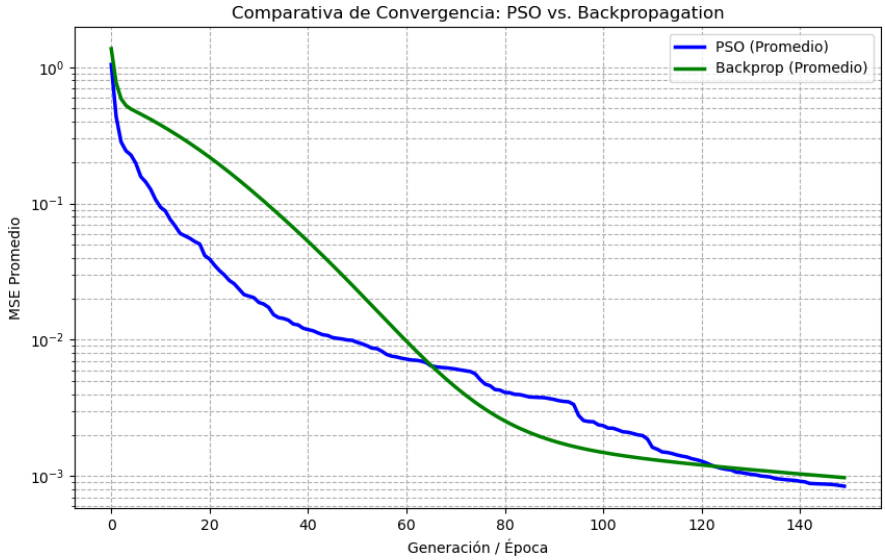


Figura 6 Comparación de las curvas de convergencia promedio para PSO (azul) y Backpropagation (verde) a lo largo de 100 iteraciones.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de la sección anterior proporcionan los datos para interpretar el rendimiento del algoritmo de optimización. En esta sección, se analiza el significado de estos hallazgos, se abordan las preguntas de investigación planteadas y se discuten las implicaciones del estudio.

4.1 Analisis del Comportamiento de PSO

Los resultados obtenidos sugieren que el desempeño consistente del optimizador PSO reside directamente de su mecánica de búsqueda poblacional. En la Figura 4 se observa un equilibrio entre la exploración inicial y explotación posterior. Durante las iteraciones iniciales, la elevada diversidad del enjambre le permite muestrear una amplia regio del espacio de parametros, lo que aumenta la probabilidad de que las partículas localicen regiones prometedoras. A medida que el enjambre localiza estas regiones, la comunicación entre las partículas (a través del término *gbest*) hace que la diversidad disminuya, lo que indica una transición hacia una fase de explotación.

Esta fase de ajuste fino permite al algoritmo converger de manera precisa hacia una solución de bajo error, como se observa en la trayectoria de los parámetros en la **Figura. 3**. Este comportamiento dual es fundamental para el éxito de los metaheurísticas en problemas de optimización complejos.

4.2 La Robustez de PSO frente a la Búsqueda Local

La diferencia más notable entre los dos métodos reside en su robustez. La **Tabla 2** muestra que PSO no solo alcanzó un MSE promedio inferior, sino que también tuvo una desviación estándar significativamente menor, junto con una tasa de éxito del 100%. En contraste, Backpropagation mostró una mayor variabilidad en sus resultados y falló en alcanzar el umbral de éxito en aproximadamente el 13% de las ejecuciones.

Esta disparidad en la fiabilidad puede explicarse directamente por la topografía de la superficie o plano de solución visualizado en la **Figura 5**. La presencia de múltiples valles y una estructura no convexa crea trampas potenciales para un algoritmo de búsqueda local como Backpropagation. Al seguir exclusivamente la información del gradiente local, es propenso a quedar atrapado en un mínimo local que, si bien es un punto de bajo error, no representa la solución óptima global. Por otro lado, la naturaleza poblacional de PSO le permite mantener una perspectiva global del espacio de búsqueda. Si una parte del enjambre queda atrapada en un mínimo local, otras partículas que exploran diferentes regiones pueden encontrar una solución superior y, a través del mecanismo de comunicación social, guiar al resto del enjambre hacia esa mejor área.

4.3 El Compromiso entre Velocidad y Fiabilidad

Si bien PSO demostró una mayor robustez, Backpropagation fue considerablemente más rápido en términos de tiempo de cómputo. Esta diferencia se debe a sus fundamentos operativos. Backpropagation realiza un cálculo de gradiente y una actualización de parámetros por cada punto de datos, un proceso computacionalmente eficiente. En cambio, PSO requiere evaluar la función de *fitness* (que implica una pasada completa por todo el conjunto de datos) para cada una de las 40 partículas en cada una de las 100 generaciones.

Esto presenta un compromiso fundamental entre velocidad y fiabilidad. Para problemas donde la superficie de solución es relativamente simple o donde la velocidad de entrenamiento es el factor crítico, Backpropagation sigue siendo una opción muy atractiva. Sin embargo, para problemas "caja *negra"* o aquellos donde se sospecha una alta complejidad del paisaje de error y donde la fiabilidad de la solución final es primordial, el costo computacional adicional de un método como PSO puede estar justificado para garantizar una convergencia a una solución de alta calidad.

4.4 Limitaciones del Estudio

Es importante reconocer las limitaciones de este trabajo. El estudio se centró en una única y relativamente simple arquitectura de red neuronal (1-2-1) y en una tarea específica de seguimiento de señal. El rendimiento comparativo de los algoritmos podría variar en arquitecturas más profundas o complejas, donde el número de dimensiones del espacio de búsqueda (el "*curse of dimensionality"*) se convierte en un desafío mayor para cualquier algoritmo de optimización. Además, solo se evaluó PSO; otras metaheurísticas, como los algoritmos genéticos o la optimización por colonia de hormigas, podrían ofrecer diferentes perfiles de rendimiento.

4.5 Implicaciones y Futuras Líneas de Investigación

A pesar de sus limitaciones, los resultados de este estudio sugieren que los algoritmos metaheurísticos como PSO son una alternativa viable y robusta para el entrenamiento de redes neuronales, especialmente en contextos donde los métodos basados en gradiente pueden fallar. Este es el caso de arquitecturas con funciones no diferenciable so problemas de optimización con funciones de coste discontinuas.

Sería valioso aplicar esta metodología comparativa a problemas de mayor complejidad, como el seguimiento de señales caóticas o el entrenamiento de redes neuronales recurrentes. Otra área es la investigación de algoritmos híbridos que combinen las fortalezas de ambos enfoques. Por ejemplo, se podría utilizar PSO para una búsqueda global inicial que localice una región prometedora del espacio de búsqueda, y luego emplear Backpropagation para un ajuste fino y rápido dentro de esa región.

5. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) como método de entrenamiento para una red neuronal en una tarea de seguimiento de señal, y comparar su rendimiento con el algoritmo de Backpropagation. A través de un riguroso análisis experimental, se han extraído las siguientes conclusiones principales:

En primer lugar, los resultados confirman que PSO constituye un método de entrenamiento notablemente robusto y eficaz para la arquitectura bajo estudio. Su desempeño no solo fue consistente, sino infalible, alcanzando una tasa de éxito del 100% en todas las réplicas experimentales. Esta remarcable confiabilidad puede atribuirse directamente a su mecánica de búsqueda poblacional, la cual, al equilibrar de manera inteligente la exploración del espacio de soluciones con la explotación de regiones prometedoras, demostró una capacidad superior para navegar los complejos paisajes de error típicos de estos problemas.

- El algoritmo PSO es un método de entrenamiento robusto y eficaz para la arquitectura de red propuesta. Demostró una capacidad consistente para encontrar conjuntos de parámetros que minimizan el error de seguimiento, logrando una tasa de éxito del 100% en todas las ejecuciones. Esto se deben a su dinámica de búsqueda, que equilibra la exploración global y la explotación local, que le permite navegar la superficie de solución.
- Mientras que Backpropagation es más rápido, su naturaleza de búsqueda local lo hace susceptible a mínimos locales, lo que resulta en una mayor variabilidad de rendimiento y una menor tasa de éxito. En contraste, PSO proporciona una solución más fiable y precisa, posicionándolo como un método superior para problemas donde la calidad y la consistencia de la solución son críticas, a costa de un mayor tiempo computacional.

En resumen, este trabajo establece que las metaheurísticas, y en particular PSO, no solo son una alternativa viable, sino una herramienta potente y fiable para el entrenamiento de redes neuronales. Ofrecen una solución robusta al desafío de superficies de solución no convexas, abriendo la puerta a su aplicación en problemas de optimización más complejos donde los métodos tradicionales basados en gradiente pueden resultar insuficientes.

REFERENCIAS

Choromanska, A., Bena, M., LeCun, Y., & Arous, G. (2015). The loss surfaces of multilayer networks. Journal of Machine Learning Research, 38, 192–204.

Clerc, M., & Kennedy, J. (2002). The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(1), 58–73.

Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2003). Introduction to evolutionary computing. Springer.

Engelbrecht, A. P. (2007). Computational intelligence: An introduction (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT Press.

Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H., & De Jesús, O. (2014).Neural network design (2nd ed.). [Disponible en: http://hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf]. Martin Hagan.

Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. Neural Networks, 2(5), 359–366.

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks, 4, 1942–1948. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968

Ljung, L. (1999). System identification: Theory for the user (2nd ed.). Prentice Hall.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. Nature, 323, 533–536.

Yudong, Z., & Lenan, W. (2015). A survey on swarm intelligence for training artificial neural network. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 6, 257–271.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

COMPUTACIÓN E INFORMÁTICA
Recibido 16 Sep. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*
Aceptado 03 Nov. 2025

Protección de Datos Biométricos en Vídeos Disponibles en Datasets Mediante Face Swapping

Biometric Data Protection in Videos Available in Datasets through Face Swapping

Héctor Caballero Hernández[1]
hcaballeroh240@profesor.uaemex.mx

Vianney Muñoz Jiménez[1]
vmunozj@uaemex.mx

Marco Antonio Ramos Corchado[1]
maramosc@uaemex.mx

[1] Universidad Autónoma del Estado de México

Resumen

Los datos biométricos como el rostro, la voz o las huellas dactilares son vulnerables a ataques con herramientas de inteligencia artificial (IA), ya que contienen características irremplazables en un individuo. Este trabajo presenta la aplicación de una técnica de anonimización facial basada en *face swapping* y la eliminación del fondo de las escenas en vídeos para proteger la privacidad de los participantes que aparecen en el dataset experimental LSM-VMX, el cual consta de 180 señas de la Lengua Mexicana de Señas (LSM). El proceso de anonimización ha sido desarrollado en Python para generar un cambio de rostro de los participantes empleando el modelo *inswapper_128*, mientras que la eliminación del fondo de las escenas se ha realizado mediante la librería de *rembg* de U2Net. Para probar la funcionalidad de los vídeos modificados, se entrenaron modelos basados en MediaPipe y una máquina de soporte vectorial (SVM) empleando los vídeos del dataset A (original) y del dataset B (modificado) para generar un modelo de reconocimiento de señas LSM, los resultados mostraron que la exactitud (*accuracy)* promedio para los datasets A y B fue de 0.975 y 0.983, respectivamente, lo cual demuestra que los cambios no repercutieron en el desempeño del modelo. Por otra parte, se ejecutaron pruebas de simetría facial para revisar que el proceso de anonimización fuera exitoso, empleando el modelo de VGG-face y la métrica SSIM, los resultados arrojaron que los rostros mostrados en el dataset B eran distintos a los del dataset A.

Palabras Clave: Datos biométricos, Lengua de Señas Mexicana, privacidad, datasets, anonimización, ética de la inteligencia artificial.

Abstract

Biometric data such as face, voice, and fingerprints are vulnerable to attacks using artificial intelligence (AI) tools, as they contain irreplaceable characteristics of an individual. This work presents the application of a facial anonymization technique based on face swapping and background removal from video scenes to protect the privacy of participants appearing in the LSM-VMX experimental dataset, which consists of 180 signs of the Mexican Sign Language (LSM). The anonymization process was developed in Python to generate a face swap of the participants using the inswapper_128 model, while the background removal of the scenes was performed using the U2Net rembg library. To test the functionality of the modified videos, models based on MediaPipe, and a support vector machine (SVM) were trained using the videos from dataset A (original) and dataset B (modified) to generate an LSM sign recognition model, the results showed that the average accuracy for datasets A and B was 0.975 and 0.983, respectively, which demonstrates that the changes did not impact the performance of the model. Furthermore, facial symmetry tests were run to check that the anonymization process was successful, using the VGG-face model and the SSIM metric, the results showed that the faces shown in dataset B were different from those in dataset A.

Keywords: Biometric data, Mexican Sign Language, privacy, datasets, anonymization, artificial intelligence ethics.

1. Introducción

En la actualidad, la masificación de dispositivos electrónicos con la capacidad de adquirir imágenes y vídeo ha permitido que grandes volúmenes de este tipo de datos estén disponibles en diversas plataformas en internet (redes sociales) (Nesterova, 2020). Debido a la falta de leyes que garanticen la privacidad de estos datos (Sánchez, 2020), todo el contenido relativo a exposición de datos biométricos en redes públicas es un blanco potencial para ser explotado por entidades maliciosas, cuyo objetivo principal es hacer mal uso de las características biométricas disponibles (Kumar et al., 2024), empleando algoritmos avanzados de IA es posible extraer los rasgos biométricos únicos o comportamientos conductuales para ejecutar acciones como suplantación de identidad (Lee et al., 2023).

Debido al desarrollo intensivo de algoritmos en el área de la visión por computadora y la IA para realizar tareas como clasificación y reconocimiento de objetos, para su uso en diversas áreas de la ciencia, industria y actividades cotidianas, han permitido extraer distintas características y parámetros sobre los objetos de estudio (Voulodimos et al., 2018). Estos algoritmos de IA generalmente emplean grandes volúmenes de datos ordenados, a los cuales se les conoce como datasets. Los datasets contienen objetos digitales agrupados en distintas clases semánticas, que pueden ir desde archivos de audio hasta imágenes y vídeo (Goodfellow et al., 2016). Con la aparición de conceptos como el modelo del metaverso y el desarrollo de modelos de IA generativa se ha incrementado el riesgo de un uso inadecuado de datos biométricos, los cuales no pueden ser modificados fiscalmente en las personas (Far & Rad, 2022).

Diversas aplicaciones de seguridad se han centrado en emplear distintos tipos de datos biométricos, (Chowdhury & Imtiaz, 2022), pero su recopilación conlleva riesgos significativos de privacidad que pueden derivar en robo de identidad y otras formas de daño si no se gestionan adecuadamente (Gichoya et al., 2023; Ciocca et al., 2023). Para proteger la información biométrica relacionada con rasgos faciales existen distintos métodos, entre los que se encuentran los de ofuscación directa, los cuales incluyen la pixelación, el desenfoque y el enmascaramiento (Puussaar et al., 2017), aunque estas modificaciones provocan de forma irreversible la perdida de información (Hukkelås et al., 2019; Blanton & Murphy, 2024, 2020; Hanisch et al., 2025).

Generalmente para la evaluación de los procedimientos de protección de datos biométricos se emplean las siguientes métricas.

- Métricas de anonimato. Verifican que el anonimato es completo, entre las que se encuentran los k-anonimato a otros cuasi-identificadores (ropa, fondo, etc.) (Sweeney, 2002).
- Riesgo de reidentificación. Busca verificar la identificación facial mediante ataques de reidentificación basados en otras señales contextuales (Tanuwidjaja et al., 2020).
- Utilidad de los datos. Se basa en evaluar de forma preliminar entrenando un modelo base de reconocimiento de señas sobre el dataset anonimizado.
- Consistencia y fidelidad visual. Evalúa cualitativamente la fluidez de las transiciones y el realismo de los rostros anonimizados, aplicando métricas cuantitativas como SSIM (Structural Similarity Index) (Wang et al., 2004) o FVD (Ciftci et al., 2023).

En este contexto, la importancia de los datasets permite generar diversas aplicaciones, entre las que encuentra la detección de la lengua de señas, debido a que en el mundo existen más de 475 millones de personas con deficiencias asociadas a la audición y al habla (FMS) (OMS, 2021; FMS, 2025).

En México hay más de 2.3 millones de personas con problemas de la audición y del habla, de este grupo de personas miles de ellas emplean la Lengua Mexicana de Señas para comunicarse, (INEGI, 2021), aunque existe una barrera digital significativa debido a la escasez de datasets de vídeo de alta calidad y a gran escala, lo cual dificulta el desarrollo de sistemas de interpretación automática (Rastgoo et al., 2021), a diferencia de otras lenguas de señas como la Americana (ASL) o la Británica (BSL).

Aunque en la actualidad se han desarrollado diversos esfuerzos para crear datasets para la LSM (Rodriguez et al., 2025; Martínez-Sanchez et al., 2023; Lara-Ortiz et al., 2025; Espejel et al. 2024: Trujillo-Romero et al., 2023), aún sigue siendo una tarea pendiente, el desarrollo de un dataset solido que permita crear modelos altamente eficientes en tareas de comunicación bidireccional, entre signantes y parlantes, así como la integración de una serie de procedimientos que garantice la protección de datos biométricos contenidos en él. Por tal motivo, esta investigación presenta una metodología enfocada a determinar la viabilidad del proceso de anonimización de los participantes que se encuentran en un dataset experimental denominado como LSM-VMX, basándose en la modificación de rostros para la protección de datos biométricos, así como la eliminación del fondo de las escenas para descontextualizar el escenario en donde se ejecutó la grabación, disminuyendo la probabilidad de una reidentificación, así como eliminar ruido para el algoritmo de detección de señas.

En la siguiente sección se presentan investigaciones dedicadas a la protección de datos biométricos empleando diversas técnicas de anonimización.

2. Estado del Arte

El proceso de anonimización es un campo de estudio ampliamente estudiado, en diversas investigaciones se puede observar el uso de técnicas orientadas al reemplazo de rostros, como en Zhu et al. (2021) propusieron MegaFS, el cual es un método para el intercambio de rostros en alta resolución a nivel de megapíxeles utilizando una representación jerárquica de rasgos faciales. Por su parte, Liu et al. (2023) presentaron DeepFaceLab, un marco de trabajo flexible e integrado que facilita a los usuarios la creación de deepfakes de alta calidad, buscando mejorar la fidelidad. En Groshev et al. (2022) desarrollaron GHOST, un enfoque que perfecciona arquitecturas existentes mediante una función de pérdida basada en los ojos y estabilización de video, mientras que Huang et al. (2024) se centraron en la preservación de la identidad del rostro fuente a través de modelos generativos de sustitutos duales. La investigación de Xu et al. (2022) presenta el diseño de un marco único tanto para la recreación facial como para el intercambio, basado en la separación de identidad y atributos. En Xu et al. (2022) se introdujo MobileFaceSwap, el cual es un sistema ligero para el intercambio de rostros en video en tiempo real en dispositivos móviles.

En Huang et al. (2023) abordaron la detección mediante un método que identifica inconsistencias entre la identidad explícita e implícita de un rostro, mientras que Ding et al. (2021) exploraron la anti-forensia, creando un modelo para generar videos que engañen a los detectores. En Perea- Trigo et al. (2025), utilizaron el reemplazo de rostros como técnica para el aumento de datos para mejorar significativamente la precisión de los modelos de reconocimiento de lengua de signos.

En las técnicas relativas a la privacidad diferencial se tienen distintos trabajos como en Dong, Roth, y Su (2022) propusieron la privacidad diferencial gaussiana (GDP por sus siglas en inglés), la cual facilita el análisis de la composición de algoritmos privados y la interpretación de sus garantías. En Yao et al. (2024) implementaron un marco con privacidad diferencial para proteger la autenticación de identidad mediante reconocimiento facial en sistemas de entrega con drones. Por otra parte, Bozkir et al. (2021) abordaron las vulnerabilidades en los datos de seguimiento ocular, proponiendo un mecanismo de privacidad diferencial que maneja las correlaciones temporales para proteger la información biométrica en dispositivos de realidad virtual (RV) y realidad aumentada (RA). En Rot et al. (2023) desarrollaron el sistema PrivacyProber, capaz de evaluar y revertir técnicas de mejora de la privacidad en datos biométricos faciales. En Hassanpour et al. (2022) desarrollaron una metodología para aplicar la privacidad diferencial al aprendizaje continuo, logrando un equilibrio entre la privacidad y la utilidad del modelo.

En Sharma, Das, y Chaudhury (2025) desarrollaron un sistema descentralizado basado en realidad extendida (XR, por sus siglas en inglés) y un criptosistema biométrico híbrido para la visualización segura y colaborativa de datos médicos en 3D. En Jeremiah et al. (2024) propusieron PrivacyGuard, la cual es una arquitectura colaborativa para la anonimización facial en grabaciones de CCTV. Por su parte, Jamil y Jamil (2024) presentaron un enfoque dual denominado IncepX- Ensemble, se encarga de realizar el reconocimiento étnico y la anonimización facial. El trabajo de Mishra, Pagare, y Sharma (2025), desarrollaron un método híbrido que combina PNL (procesamiento del lenguaje natural) basado en reglas y aprendizaje automático para detectar y anonimizar con precisión información personal identificable en documentos financieros.
Finalmente, en Xu et al. (2024) diseñaron un esquema de anonimización reversible para imágenes faciales utilizando aprendizaje cíclico, lo que permite desidentificar los datos para proteger la privacidad y reidentificarlos de forma segura cuando sea necesario.

Los trabajos presentados en el área de la anonimización se han desarrollado diversos métodos que van desde el reemplazo de rostros, pasando por la privacidad diferencial, hasta la combinación de plataformas hibridas basadas en la nube y métodos que garantizan la reversibilidad de este proceso de forma segura. En la siguiente sección se presenta una metodología para la anonimización de un dataset experimental de la LSM, con la finalidad de analizar la viabilidad de la protección de datos biométricos sin perder las características esenciales de los movimientos que permita generar modelos de IA para el reconocimiento del lenguaje de señas LSM.

3. Metodología

En el presente capítulo se detalla el proceso metodológico de esta investigación, el cual se centra en la construcción de un dataset experimental de la LSM denominado como LSM-VMX. Este dataset servirá para corroborar los efectos de la implementación de *face swapping*, y comparar el rendimiento en el proceso de evaluación de cada modelo generado (videos originales versus modificados), empleando las métricas de desempeño de exactitud, puntuación F1, entre otras. En la Figura 1 se muestran las etapas de la metodología empelada para llevar a cabo la modificación de rostros en datasets.

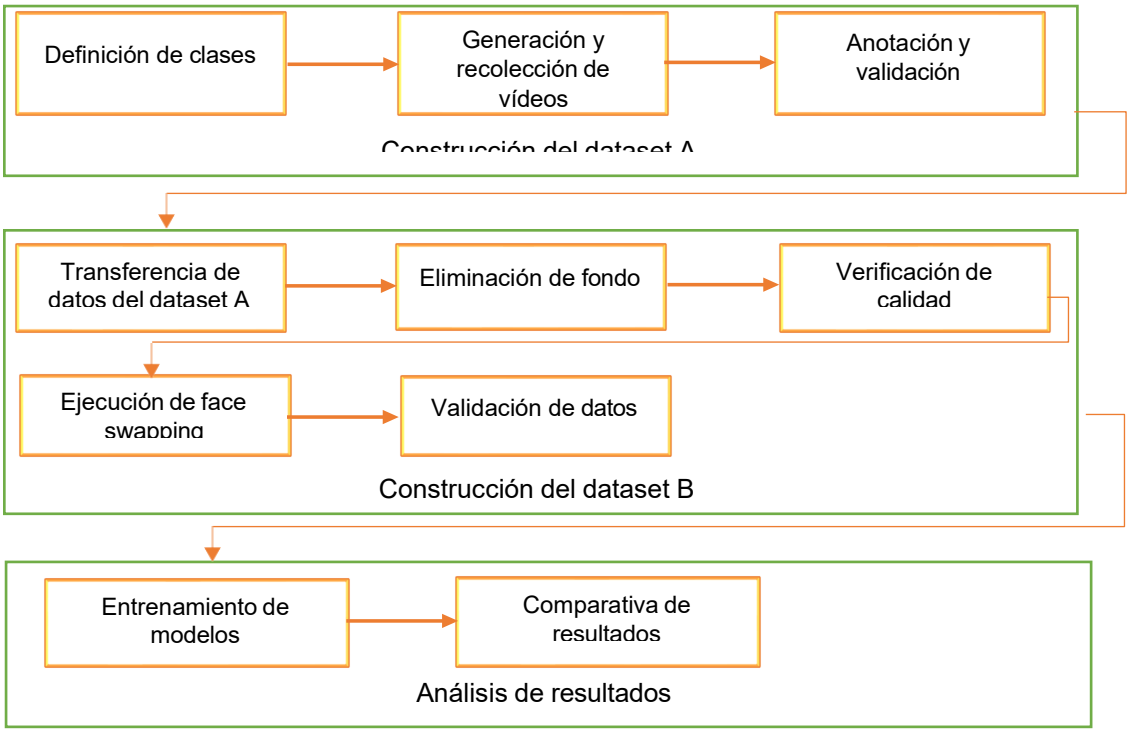


Figura 1. Flujo metodológico para el proceso de anonimización de vídeos

El flujo metodológico expresado en la Figura 1 cuenta con 3 etapas importantes, las cuales son: la construcción de dataset A y B, y el análisis comparativo.

- Definición del dataset A:
    1. Definición de clases. Se seleccionaron 180 señas de uso frecuente en la LSM, agrupadas en 9 categorías semánticas: animales, colores, preguntas comunes, saludos y despedidas, prendas de vestir, objetos de casa y oficina, dígitos y letras.
    2. Generación y recolección de vídeos. Se reclutaron 10 personas para realizar las señas. Además de las grabaciones controladas, se incluyeron vídeos extraídos de internet con licencia para reproducción para aumentar la diversidad de signantes y entornos.
    3. Anotación y validación. Cada vídeo fue etiquetado con la glosa en español, la categoría semántica y si la persona que grabó el vídeo pertenece la sexo masculino o femenino. El dataset final contiene 3600 vídeos.

- Construcción del dataset B:

    4. Transferencia de datos del dataset A. Terminando el proceso de construcción de dataset A se procede a transferir una copia de este, sin modificar los nombres de los vídeos contenidos en las clases.

    5. Eliminación de fondo. Los vídeos MP4 del dataset B son modificados para eliminar el fondo, limitando la posibilidad del reconocimiento del lugar en donde se realizó la escena, así como eliminar ruido que afecte el algoritmo de reconocimiento de señas.

    6. Verificación de calidad. De manera manual y visual se verifica que los vídeos a los que se les ha eliminado el fondo no presenten aberraciones visuales.

    7. Ejecución de *face swapping*. Una red neuronal convolucional (CNN) se encarga de detectar de la segmentación del rostro, para posteriormente emplear una imagen de reemplazo (dependiendo del sexo del participante), en este caso, el rostro de reemplazo debe de ser una figura pública o generada por IA.

    8. Validación de datos. Los vídeos son revisados manualmente para comprobar que no presente anomalías visuales que impidan su reproducción o aparición de ruido por la eliminación del fondo.

- Comparativa de resultados:

    9. Entrenamiento. Los modelos son entrenados por el algoritmo MediaPipe (Lugaresi et al., 2019) y SVM (support vector machine). Al terminar el proceso se obtienen los resultados de las métricas de exactitud, precisión y recuperación.

    10. Análisis de resultados. Se verifica el rendimiento de los modelos para determinar si los cambios de eliminación de fondo y cambio de rostro no han provocado modificaciones sensibles en la interpretación de las señas, así como el cálculo de la posibilidad de la identificación de las personas que han pasado por un proceso de anonimización digital.

El Algoritmo 1 presenta el proceso de *face swapping* y eliminación de escenas de fondo. De forma general, se instalan las dependencias insightface, onnxruntime, *rembg* y opencv-python, posteriormente se emplea un modelo inswapper_128.onnx para el intercambio de rostros, se cargan las direcciones de los vídeos y los rostros modelos, los vídeos entran en un ciclo para su procesamiento y finalmente se crean nuevas carpetas para generar el dataset B.

Algoritmo 1. Modificación de vídeos para protección de datos
1. Inicio 2. Instalar las dependencias visión por computadora. 3. Descargar el modelo *face_swapper* de modificación de rostros de rostros. 4. Definir las rutas del *rostro_modelo* (la nueva cara, de dominio público y relacionada con el sexo del participante) y el vídeo de destino (del dataset LSM-VMX). 5. Cargar en memoria la librería rembg para la eliminación de fondo. 6. Ciclo para cada cuadro del vídeo: ▪ Identificación del objeto. ▪ Segmentación del fondo de la escena. ▪ Generación del canal alfa. ▪ Almacenamiento de *vídeo_intermedio*. 7. Cargar en memoria los modelos de IA para el análisis y el intercambio facial.
8. Procesar la imagen de origen para extraer el *rostro_modelo* que se utiliza para el reemplazo. 9. Leer el vídeo de destino cuadro por cuadro y configurar un archivo de vídeo para guardar el resultado. 10. Ciclo para cada cuadro de *vídeo_intermedio*: ▪ Se detectan todos los rostros en el cuadro actual. ▪ Si se detectan rostros, el modelo *face_swapper* reemplaza cada rostro detectado con el *rostro_modelo*. ▪ Si no se detectan rostros, el cuadro se mantiene sin modificar. ▪ Eliminar fondo de las escenas. ▪ El cuadro (original o modificado) se escribe en el archivo de vídeo de salida. 11. Procesados todos los cuadros, se libera la memoria y se guarda el vídeo final en dataset B. 12. Fin

El Algoritmo 2, presenta los pasos a desarrollar para la evaluación del modelo original y del modelo que recibió los vídeo modificados. Este algoritmo se divide en 3 etapas, en la etapa 1 para cada dataset (original y modificado) emplea MediaPipe para analizar cada fotograma de cada vídeo y detectar los 21 puntos clave de la mano. Posteriormente, se normalizan estos puntos tomando la muñeca como punto de referencia (el punto cero). Al final, cada vídeo se convierte en un vector que representa matemáticamente la seña.

Algoritmo 2. Entrenamiento de modelos de datasets
1. Inicio 2. Inicializar una lista vacía para los puntos clave del vídeo. 3. Para cada fotograma del vídeo (hasta un límite de 30): • Detectar los 21 puntos clave de la mano usando MediaPipe. • Si se detecta una mano, normalizar las coordenadas de todos los puntos restándoles las coordenadas de la muñeca. 4. Añadir los puntos normalizados a la lista del vídeo. 5. Aplanar todos los puntos clave del vídeo en un único vector numérico. 6. Almacenar todos los vectores numéricos (x) y sus etiquetas correspondientes (y). 7. Dividir el conjunto de datos (x, y) en un 80% para entrenamiento y un 20% para pruebas. 8. Definir una serie de hiperparámetros a probar para el SVM (valores de C y gamma). 9. Utilizar grid search con validación cruzada sobre los datos de entrenamiento para encontrar la combinación de hiperparámetros que genere el modelo más preciso. 10. Usar el modelo mejor evaluado para hacer predicciones sobre los datos de prueba. 11. Calcular y guardar las métricas de rendimiento: reporte de clasificación (precisión, recall, y puntuación F1). 12. Fin

Al finalizar el proceso de comparación entre ambos modelos se realiza un ciclo encargado de analizar el proceso de comparativo entre los vídeos del dataset A y el dataset B mediante el empleo de SSIM, debido a que es una métrica ampliamente eficaz para para determinar las diferencias entre imágenes.

En la siguiente sección se presentan los resultados al emplear la metodología mencionada en esta sección, con la finalidad de comprobar la vialidad de agregar protección a los datos biométricos (rostro) contenidos en vídeos para datasets públicos.

4. Resultados y Evaluación

En este apartado se describe el proceso empleado para el desarrollo de las pruebas a la metodología del proceso de anonimización de lo vídeos contenidos en el dataset LSM-VMX. En la Tabla 1 se presentan las condiciones experimentales para el desarrollo de las pruebas.

Tabla 1. Elementos considerados para el proceso de experimentación

Elementos considerados	Descripción
Software	Python 12 Google Colab Modelo pre-entrenado inswapper 128.onnx Librería *rembg*
Hardware	Computadora de escritorio iMac M4 con 16 GB de RAM y 256 GB de almacenamiento
Dataset	Conformado por 9 categorías semánticas: animales, colores, preguntas comunes, saludos y despedidas, prendas de vestir, objetos de casa y oficina, dígitos y letras
Métricas de desempeño	- Exactitud, precisión, puntuación F1 y mAP@0.5 para los modelos generados para reconocimiento de señas. - SSIM y VGG face para comprobación de diferencias estructurales con el cambio de rostros.

El proceso de anonimización se ha ejecutado en 4 etapas, la primera etapa ha consistido en la eliminación del fondo de los vídeos del d~~ataset A, esta etapa~~ se ha ejecutado en el computador iMac debido a su efectividad y velocidad para la eliminación de fondos, la segunda etapa se ejecutó en una máquina virtual de Google Colab para aprovechar la potencia de cálculo de la GPU disponible para el proceso de *face swapping* y solventar problemas de compatibilidad con algunas librería del proceso de *face swapping*. La tercera etapa ha consistido en realizar el entrenamiento de los modelos, empleando la librería de MediaPipe en combinación de una SVM, empleando los datos de los datasets A y B. Finalmente, la cuarta etapa consistió en la evaluación de las métricas de desempeño de los modelos, empleando exactitud, precisión, puntuación F1 (Jacob et al., 2021) y mAP@0.5 (Everingham et al., 2010) para que los resultados sean comparados entre ambos modelos, y verificar las diferencias entre ambos. Las ecuaciones para calcular la exactitud (1), precisión (2), puntuación F1 (3), SSIM (4), SSIM de fotograma medio (5) y SSIM facial medio (6) se presentan a continuación.

Donde:

$$\text{Exactitud} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TN}} \quad (1)$$

$$\text{Precisión} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (2)$$

$$\text{F1} = 2 \text{ x } \frac{\text{Precisión x Exhaustividad}}{\text{Precisión} + \text{Exhaustividad}} \quad (3)$$

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (4)$$

$$\text{SSIM de fotograma medio} = \frac{1}{V_{total}} \sum_{j=1}^{V_{total}} \left(\frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} S_{fotograma,ij} \right) \quad (5)$$

$$\text{SSIM facial medio} = \frac{1}{V_{total}} \sum_{j=1}^{V_{total}} \left(\frac{1}{O_j} \sum_{i=1}^{O_j} S_{rostro,ij} \right) \quad (6)$$

Verdadero positivo (TP). El modelo predijo correctamente la clase positiva.

Falso positivo (FP). El modelo predijo incorrectamente la clase positiva (error de tipo I).

Falso negativo (FN). El modelo predijo incorrectamente la clase negativa (error de tipo II).

Verdadero negativo (TN). El modelo predijo correctamente la clase negativa.

μ_x es la media de todos los valores de píxeles en la imagen x.

μ_y es el promedio (media) de todos los valores de píxeles en la imagen y.

σ_x^2 es la varianza de la imagen x.

σ_y^2 es la varianza de la imagen y.

σ_x y σ_y son las desviaciones estándar.

σ_{xy} es la covarianza entre las imágenes x y y.

C_1 y C_2 son constantes contantes para evitar la división entre 0.

M son pares de fotogramas

S es el valor de SSIM de los fotogramas pares

V_{total} total de vídeos.

M_j fotogramas analizados

O_j es el número de pares de rostros analizados exitosamente en el vídeo j

En la Figura 2 a) y Figura 2 b) se presentan los rostros empleados para ejecutar el *face swapping*, tomando en cuenta si eran hombre o mujeres los sujetos aparecen en los vídeos originales, debido a que los rasgos morfológicos entre los participantes de diferentes sexos cambian, en este caso se han elegido la figura pública como Salma Hayek y Fernando Colunga.

Rostro de reemplazo para mujeres

a) Rostro de Salma Hayek

Rostro de reemplazo para hombres

b) Rostro de Fernando Colunga

Figura 2. Rostros empleados para realizar *face swapping* en los vídeo disponibles en el dataset A.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos al evaluar los modelos generados empleando los datasets A y B, donde es posible ver que las diferencias entre los resultados obtenidos no son significativas, debido a que los cambios realizados por la eliminación del fondo y del rostro no han afectado los movimientos que se observan en los vídeos, esto se puede observar en los puntajes obtenidos en las métricas de exactitud, puntuación F1 y precisión, donde las diferencias entre los modelos se encuentran en el orden de céntimas de unidad. A pesar de altos puntajes obtenidos en las pruebas, se puede inferir que existe un sobreentrenamiento en ambos modelos, este fenómeno será abordado en futuras iteraciones mediante el incremento de una mayor cantidad de vídeos para cada clase, ya que el objetivo principal de este estudio es evaluar las diferencias resultantes de la aplicación del proceso de anonimización mediante la modificación de rostros y la eliminación del fondo de las escenas.

Tabla 2. Comparación de resultados al evaluar los modelos obtenidos de los dataset A y B de detección de señas basándose en el dataset experimental LSM-VMX.

Tipo de modelo	Exactitud	Puntaje F1	Precisión
Basado en dataset original	0.975	0.971	0.976
Basado en dataset modificado por eliminación de fondo y *swapping*	0.973	0.978	0.983

En la Figura 3 a) se presenta el vídeo de la seña alacrán sin modificaciones, mientras que en la Figura 3 b) se muestra el vídeo con el proceso de anonimización con respecto al fondo y la modificación del rostro del participante, por otra parte, en las Figuras 3 c) y Figura 3 d) se presentan dos extractos de la seña amarillo, en estas es posible identificar que el proceso de anonimización ha modificado la calidad de vídeo, aunque es importante señalar que el reemplazo del rostro se realizó exitosamente, pero no se presentan algunos detalles visuales que contrastan con respecto a los de la Figura 3 b), donde el proceso de reemplazo y eliminación de fondo se han logrado sin dejar rastro de la eliminación del fondo principal.
Finalmente en las Figura 3 e) y Figura 3 f) y Figura 3 g) y Figura 3 h), el participante seleccionado es un hombre que realiza las señas avestruz y agua, respectivamente, donde es posible observar que en los vídeo de los incisos f y h de la Figura 3, el reemplazo de rostro se logró de manera exitosa, aunque en el inciso h, es posible observar que existe en el fondo un elemento que no se eliminó del todo, aunque el movimiento ejecutado respecto a la seña no presenta ningún cambio en relación al vídeo original, demostrando el éxito de la técnica de face swapping aplicada.

Video original

Video con *face swapping*

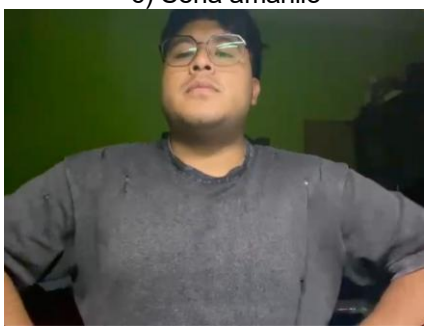
a) Seña alacrán

b) Seña alacrán, con rostro modificad

Video original

Video con *face swapping*

c) Seña amarillo



d) Seña amarillo

e) Avestruz

f) Seña avestruz

g) Seña agua

h) Seña agua

Figura 3. Resultados comparativos entre los resultados del dataset A versus dataset B

La Tabla 2 muestra los resultados respectivos al análisis efectuado al momento de calcular la distancia promedio facial mediante el modelo VGG-Face. El método propuesto para el reemplazo de rostro mediante *face swapping* ha cumplido con el objetivo de anonimización, debido a que el valor obtenido en la métrica de distancia facial ha permitido determinar que la morfología de rostro es completamente diferente, tomando en cuenta las pruebas ejecutadas por el modelo VGG-Face al considerar que la distancia entre rostros es mayor a 0.40. Al analizar el resultado de la evaluación de la métrica SSIM fácil medio es posible verificar que ha cambiado completamente sin dejar rastros estructurales con respecto a los originales con un puntaje menor a 0.290 puntos. El SSIM de fotograma medio demuestra que el proceso de eliminación de fondo y cambio de rostro ha cambiado completamente la escena original, teniendo en cuenta que el valor obtenido es inferior a 0.320 y considerando que lo valores aceptables del SSIM para indicar que una escena es similar a la otra varía entre 0.9 y 1.0, siendo 1.0 el puntaje que indica que los elementos comparados son idénticos. Por otra parte, es posible determinar que técnicamente la identificación del espacio en donde se grabó el vídeo no es identificable, dando como resultado un incremento en la privacidad de la escena.

Tomando en cuenta las métricas del rendimiento de modelo de reconocimiento de señas con las métricas de los modelos de IA es posible afirmar que no existen cambios significativos en el desempeñó entre el modelo generado empelando el dataset A o el modelo generado empleando el dataset B. Además, el proceso de eliminación de fondo ha creado diferencias visuales importantes entre los vídeos, además de contribuir ligeramente a obtener desempeño favorables en el puntaje F1 y en la precisión, sumado a la incorporación de la modificación del rostro.

Tabla 2. Comparación de valores de métricas de rendimiento en el proceso de anonimización

Distancia facial promedio calculada con VGG-Face	SSIM facial medio	SSIM de fotograma promedio
0.7312	0.2840	0.3149

Si bien, el proceso de anonimización ha sido exitoso, el principal desafío que se ha encontrado al analizar los resultados obtenidos es el equilibrio entre una privacidad robusta y la máxima utilidad de los datos, además de que en fases futuras será necesario implementar etapas de matizado y texturización sobre las zonas donde empieza el proceso de cambio de rostro, así como la evaluación adaptación de enfoques de fuentes de iluminación para crear una sensación de que el vídeo no presenta modificaciones, tomando en cuenta procesos como los seguidos en las investigaciones de la Zhu et al. (2021) y Liu et al. (2023). Por otra parte, el enfoque de la presente investigación es novedoso desde la perspectiva de resguardar la privacidad de los datos biométricos en vídeos referentes a lenguas de signos, en este caso para la LSM, aunque existen propuestas que han basado su metodología para el entrenamiento de modelos de lenguas de signos como se muestra en Perea-Trigo, et al. (2025) con el objetivo de incrementar los vídeos disponibles y su viabilidad en el proceso de entrenamiento. El proceso de *face swapping* demostró ser eficaz, pero se tiene que tomar en cuenta que la robustez de cualquier técnica de anonimización frente a ataques de reidentificación en constante evolución es una posibilidad que debe de ser tomada en cuenta (Wenger et al., 2022).

Como se ha observado en el análisis de los resultados numéricos y visuales del proceso de anonimización del dataset LSM-VMX, se ha cumplido con el objetivo de anonimizar a los participantes y lograr que los datos generados preserven sus características esenciales para lograr modelos de IA útiles en el reconocimiento de señas.

El proceso de creación y distribución de datasets con datos biométricos implícitos o explícitos plantea desafíos complejos desde la perspectiva ética y legal, por tal motivo este trabajo ha abordado el principio de la privacidad como parte fundamental del ciclo de vida del dataset (Cavoukian, 2011). Si bien es cierto que en México las leyes sobre protección de los datos biométricos no están ampliamente desarrolladas, como se estipula en regulaciones como el GDPR en Europa, la CCPA en California y la emergente Ley de IA de la UE (Voigt & von dem Bussche, 2017; European Parliament, 2024), este trabajo aboga por un manejo proactivo de la privacidad de los datos públicos que se encuentran disponibles en medios públicos, los cuales se encuentra disponibles para todo tipo de público, bajo este contexto, las personas que emplean estos datos no declaran la finalidad del uso de este tipo de información generando incertidumbre sobre el uso que se le dará, pero mediante el anonimato de los participantes en este tipo de datasets se reduce la posibilidad de un mal uso de este tipo de datos. Los resultados obtenidos en esta investigación representan un punto de partida para el desarrollo de nuevas propuestas para garantizar la integridad de los datos biométricos que se encuentran disponibles de forma pública en internet relativos a la LSM, así como dar pauta nuevos desarrollos que permitan generar nuevos datasets en donde la información biométrica no se vea comprometida.

6. Conclusiones

Este trabajo se ha centrado en demostrar la viabilidad de la implementación de un proceso de anonimización para el reemplazado de rostros mediante face swapping en vídeos provenientes de un dataset experimental de señas LSM. Los resultados han indicado que al momento de entrenar los modelos de reconocimiento de señas LSM demostraron que técnicamente no existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos al evaluar los modelos con las métricas de exactitud, precisión y score F1, debido a que las variaciones están en orden de céntimas de unidad, así como valores de SSIM facial medio para SSIM por fotograma promedio son inferiores a 0.31 puntos, indicando diferencias drásticas entre los vídeos originales y los vídeos modificados en el proceso de anonimización.

De acuerdo con lo observado durante la ejecución de las pruebas, es posible verificar que los rasgos morfológicos de los rostros empleados se adecuan limpiamente a los rostros que no presentan alguna modificación, siendo factible el empleo de face swapping para proteger la identidad de las personas con respecto a la exposición de sus rasgos biométricos más sensibles a usurpación, tomando en cuenta que la eliminación del fondo de las escenas beneficio ligeramente los resultados de las métricas de puntaje F1 y precisión, además de que los datos obtenidos son 100% útiles para generar modelos de reconocimiento de señas LSM.

Trabajo Futuro

Como trabajo a futuro se proponen dos vertientes a ejecutar en paralelo, en primera instancia, se extenderá el proceso de anonimización para cambiar el color de la vestimenta, el fondo para crear otro tipo de escenario, así como la elección de un rostro de reemplazo que se ajuste al del participante en vídeo de manera automática de acuerdo a su morfología específica, en segunda instancia, se desarrollará un sistema con la capacidad de generar avatares que permitan replicar las señas LSM contemplando gestos faciales y manuales, con la finalidad conformar un dataset para el entrenamiento de modelos de IA con altos niveles de exactitud.

Referencias

Blanton, M., & Murphy, D. (2024, June). Privacy preserving biometric authentication for fingerprints and beyond. In *Proceedings of the Fourteenth ACM Conference on Data and Application Security and Privacy* (pp. 367-378). https://doi.org/10.1145/3626232.3653269.

Bozkir, E., Günlü, O., Fuhl, W., Schaefer, R. F., & Kasneci, E. (2021). Differential privacy for eye tracking with temporal correlations. *PLoS ONE, 16*(8), e0255979. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255979.

Cavoukian, A. (2011). Privacy by Design: The 7 Foundational Principles. Information and Privacy Commissioner of Ontario.

Ciftci, U. A., Yuksek, G., & Demir, I. (2023). My face my choice: Privacy enhancing deepfakes for social media anonymization. In *Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision* (pp. 1369-1379).

Ciocca, G., Napoletano, P., & Schettini, R. (2023). A review on deep learning based biometric recognition. Pattern Recognition Letters, 173, 43-52. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2023.08.012.

Chowdhury, A. M., & Imtiaz, M. H. (2022). Contactless fingerprint recognition using deep learning—a systematic review. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, *2*(3), 714-730. https://doi.org/10.3390/jcp2030036.

Ding, F., Zhu, G., Li, Y., Zhang, X., Atrey, P. K., & Lyu, S. (2021). Anti-forensics for face swapping

videos via adversarial training. *IEEE Transactions on Multimedia, 24*, 3429-3441. 10.1109/TMM.2021.3098422.

Dong, J., Roth, A., & Su, W. J. (2022). Gaussian differential privacy. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, 84*(1), 3-37. https://doi.org/10.1111/rssb.12454.

Espejel, J., Jalili, L. D., Cervantes, J., & Canales, J. C. (2024). Sign language images dataset from Mexican sign language. *Data in Brief*, *55*, 110566. 10.1016/j.dib.2024.110566.

European Parliament. (2024, March 13). EU AI Act: First regulation on artificial intelligence. https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20230601STO93804/eu-ai-act-first-regulation-on-artificial-intelligence

Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., & Zisserman, A. (2010). The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge. International Journal of Computer Vision, 88(2), 303–338. https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4.

Far, S. B., & Rad, A. I. (2022). Applying digital twins in metaverse: User interface, security and privacy challenges. *Journal of Metaverse*, *2*(1), 8-15.

Federación Mundial de Sordos. (s.f.). Building a World Where Everywhere Deaf People Can Sign Anywhere! Recuperado el 20 de agosto de 2025, de https://wfdeaf.org.

Gichoya, J. W., Thomas, K., Celi, L. A., Safdar, N., Banerjee, I., Banja, J. D., ... & Purkayastha, S. (2023). AI pitfalls and what not to do: mitigating bias in AI. *The British Journal of Radiology*, *96*(1150), 20230023. 10.1259/bjr.20230023.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.

Groshev, A., Maltseva, A., Chesakov, D., Kuznetsov, A., & Dimitrov, D. (2022). GHOST—a new face swap approach for image and video domains. *IEEE Access, 10*, 83452-83462. 10.1109/ACCESS.2022.3196668.

Hanisch, S., Arias-Cabarcos, P., Parra-Arnau, J., & Strufe, T. (2025). Anonymization techniques for behavioral biometric data: a survey. *ACM Computing Surveys*, *57*(11), 1-54. https://doi.org/10.1145/3729418.

Hassanpour, A., Moradikia, M., Yang, B., Abdelhadi, A., Busch, C., & Fierrez, J. (2022). Differential privacy preservation in robust continual learning. *IEEE Access, 10*, 24273-24287. 10.1109/ACCESS.2022.3154826.

Huang, B., Wang, Z., Yang, J., Ai, J., Zou, Q., Wang, Q., & Ye, D. (2023). Implicit identity driven deepfake face swapping detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4490-4499).

Huang, Z., Tang, F., Zhang, Y., Cao, J., Li, C., Tang, S., ... & Lee, T. Y. (2024). Identity-preserving face swapping via dual surrogate generative models. *ACM Transactions on Graphics, 43*(5), 1-19. https://doi.org/10.1145/3676165.

Hukkelås, H., Mester, R., Lindseth, F. (2019). DeepPrivacy: A Generative Adversarial Network for Face Anonymization. In: Bebis, G., et al. Advances in Visual Computing. ISVC 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11844. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33720-9_44.

INEGI. (2021). Censo de Población y Vivienda 2020: Discapacidad. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/temas/discapacidad/.

Jamil, F., & Jamil, H. (2024, August). Toward Intelligent Ethnicity Recognition and Face Anonymization: An IncepX-Ensemble Model. In *International Conference on Computational Collective Intelligence* (pp. 243-255). Cham: Springer Nature Switzerland.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-70819-0_19.

Jeremiah, S. R., Ha, J., Singh, S. K., & Park, J. H. (2024). Privacy guard: collaborative edge-cloud computing architecture for attribute-preserving face anonymization in CCTV networks. *Human-centric Computing and Information Sciences, 14*(43), 1e16. 10.22967/HCIS.2024.14.043.

Lee, P. Y. K., Ma, N. F., Kim, I. J., & Yoon, D. (2023). Speculating on risks of AI clones to selfhood and relationships: Doppelganger-phobia, identity fragmentation, and living memories. *Proceedings of the ACM on Human-computer Interaction*, 7(CSCW1), 1-28. https://doi.org/10.1145/3579524.

Kumar, T., Bhushan, S., Sharma, P., & Garg, V. (2024). Examining the vulnerabilities of biometric systems: Privacy and security perspectives. In *Leveraging Computer Vision to Biometric Applications* (pp. 34-67). Chapman and Hall/CRC.

Lara-Ortiz, V., Fuentes-Aguilar, R. Q., & Chairez, I. (2025). Spanish to Mexican Sign Language glosses corpus for natural language processing tasks. Scientific Data, 12(1), 702. https://doi.org/10.1038/s41597-025-04871-7.

Liu, K., Perov, I., Gao, D., Chervoniy, N., Zhou, W., & Zhang, W. (2023). Deepfacelab: Integrated, flexible and extensible face-swapping framework. *Pattern Recognition, 141*, 109628. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2023.109628.

Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.-L., Yong, M. G., Lee, J., Chang, W.-T., Hua, W., Georg, M., & Grundmann, M. (2019). MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines. https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08172.

Martínez-Sánchez, V., Villalón-Turrubiates, I., Cervantes-Álvarez, F., & Hernández-Mejía, C. (2023). Exploring a novel mexican sign language lexicon video dataset. Multimodal Technologies and Interaction, 7(8), 83. https://doi.org/10.3390/mti7080083.

Mishra, K., Pagare, H., & Sharma, K. (2025). A hybrid rule-based NLP and machine learning approach for PII detection and anonymization in financial documents. *Scientific Reports, 15*(1), 22729. 10.1038/s41598-025-04971-9.

Nesterova, I. (2020). Mass data gathering and surveillance: the fight against facial recognition technology in the globalized world. In *SHS web of conferences* (Vol. 74, p. 03006). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/shsconf/20207403006.

Organización Mundial de la Salud. (2021). Informe mundial sobre la audición. https://www.who.int/publications/i/item/9789240020481.

Perea-Trigo, M., López-Ortiz, E. J., Soria-Morillo, L. M., Álvarez-García, J. A., & Vegas-Olmos, J. J. (2025). Impact of face swapping and data augmentation on sign language recognition. *Universal Access in the Information Society, 24*(2), 1283-1294. https://doi.org/10.1007/s10209-024-01133-y.

Puussaar, A., Clear, A. K., & Wright, P. (2017, May). Enhancing personal informatics through social sensemaking. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 6936-6942). https://doi.org/10.1145/3025453.302580.

Rastgoo, R., Kiani, K., & Escalera, S. (2021). Sign language recognition: A deep survey. Expert Systems with Applications, 164, 113794. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113794.

Rodriguez, M., Oubram, O., Bassam, A., Lakouari, N., & Tariq, R. (2025). Mexican Sign Language Recognition: Dataset Creation and Performance Evaluation Using MediaPipe and Machine Learning Techniques. Electronics, 14(7), 1423. https://doi.org/10.3390/electronics14071423.

Rot, P., Grm, K., Peer, P., & Štruc, V. (2023). PrivacyProber: Assessment and detection of soft–biometric privacy–enhancing techniques. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 21*(4), 2869-2887. https://doi.org/10.1109/TDSC.2023.3319500.

Sánchez, M. (2020). *Protección de datos personales biométricos*. Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales (INAI).

Sharma, S., Das, D., & Chaudhury, S. (2025). A decentralized privacy-preserving XR system for 3D medical data visualization using hybrid biometric cryptosystem. *Scientific Reports, 15*(1), 28568. https://doi.org/10.1038/s41598-025-08784-8.

Sweeney, L. (2002). k-anonymity: A model for protecting privacy. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 10(05), 557-570. https://doi.org/10.1142/S0218488502001648.

Tanuwidjaja, H. C., Choi, R., Baek, S., & Kim, K. (2020). Privacy-preserving deep learning on machine learning as a service—a comprehensive survey. *IEEE Access*, *8*, 167425-167447. 10.1109/ACCESS.2020.3023084.

Trujillo-Romero, F., & García-Bautista, G. (2023). Mexican sign language corpus: Towards an automatic translator. *ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing*, *22*(8), 1-24. https://doi.org/10.1145/3591471.

Voigt, P., & von dem Bussche, A. (2017). The EU General Data Protection Regulation (GDPR). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57959-7.

Voulodimos, A., Doulamis, N., Doulamis, A., & Protopapadakis, E. (2018). Deep learning for computer vision: A brief review. *Computational Intelligence and Neuroscience, 2018*, 7068349. https://doi.org/10.1155/2018/7068349.

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing, 13(4), 600–612. https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861.

Xu, C., Zhang, J., Han, Y., Tian, G., Zeng, X., Tai, Y., ... & Liu, Y. (2022, October). Designing one unified framework for high-fidelity face reenactment and swapping. In *European conference on computer vision* (pp. 54-71). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19784-0_4.

Xu, S., Chang, C. C., Nguyen, H. H., & Echizen, I. (2024). Reversible anonymization for privacy of facial biometrics via cyclic learning. *EURASIP Journal on Information Security, 2024*(1), 24. https://doi.org/10.1186/s13635-024-00174-3.

Xu, Z., Hong, Z., Ding, C., Zhu, Z., Han, J., Liu, J., & Ding, E. (2022, June). Mobilefaceswap: A lightweight framework for video face swapping. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 36, No. 3, pp. 2973-2981). https://doi.org/10.1609/aaai.v36i3.20203.

Yao, A., Pal, S., Dong, C., Li, X., & Liu, X. (2024, March). A framework for user biometric privacy protection in UAV delivery systems with edge computing. In *2024 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops)* (pp. 631-636). IEEE. 10.1109/PerComWorkshops59983.2024.10502849.

Zhu, Y., Li, Q., Wang, J., Xu, C. Z., & Sun, Z. (2021). One shot face swapping on megapixels. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4834-4844).

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

BIOMEDICA

Recibido 07 Sep. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 23 Sep. 2025

Nanoemulsiones: Definición, métodos de síntesis, caracterización y aplicaciones biomédicas

Nanoemulsions: Definition, synthesis methods, characterisation and biomedical applications

Abraham Gabriel Alvarado Mendoza[1*]
gabriel.alvarado@academicos.udg.mx
Valeria Sánchez González[2]
valeria.sanchez5825@alumnos.udg.mx
Rosaura Hernández Montelongo[3]
rosaura.hernandez@academicos.udg.mx
Alejandra Cruz Hernández[4]
alejandra.cruz@academicos.udg.mx

[1] Universidad de Guadalajara
[2] Maestría en Ciencias en Química
[3] Departamento de Bioingeniería Traslacional, CUCEI, Universidad de Guadalajara.
[4] Departamento de Ingeniería Mecánica Eléctrica, CUCEI, Universidad de Guadalajara.

Resumen: Las nanoemulsiones representan una plataforma emergente en la administración controlada de fármacos debido a su capacidad para transportar y liberar compuestos bioactivos, mejorar su biodisponibilidad y permitir una liberación sostenida en el sitio de acción. Su tamaño nanométrico y alta estabilidad cinética facilitan la penetración en tejidos biológicos y la protección de moléculas terapéuticas frente a la degradación enzimática. En el campo biomédico, estas nanoestructuras han mostrado gran potencial en la administración de agentes hidrofóbicos y terapias combinadas. La creciente evidencia científica respalda su potencial para revolucionar la administración farmacéutica, aunque aún persisten barreras clave para su aplicación clínica masiva. Este trabajo es un breve resumen donde se presenta una descripción de las nanoemulsiones, los métodos de síntesis más empleados y las técnicas de caracterización. Finalmente, se muestran una de sus múltiples aplicaciones, la liberación controlada de fármacos.

Palabras clave: Nanoemulsiones ,Aplicaciones Biomédicas , Métodos de síntesis, Métodos de alta energía, Métodos de baja energía

ABSTRACT

Nanoemulsions represent an emerging platform in controlled drug delivery due to their ability to transport and release bioactive compounds, improve their bioavailability, and enable sustained release at the site of action. Their nanometric size and high kinetic stability facilitate penetration into biological tissues and protect therapeutic molecules from enzymatic degradation. In the biomedical field, these nanostructures have shown great potential in the administration of hydrophobic agents and combination therapies. Growing scientific evidence supports their potential to revolutionise pharmaceutical delivery, although key barriers to their widespread clinical application remain. This paper is a brief summary presenting a description of nanoemulsions, the most commonly used synthesis methods and characterisation techniques. Finally, one of their many applications, controlled drug release, is demonstrated.

Keywords: Nanoemulsions, Biomedical Applications, synthesis methods, High energy methods, Low energy methods

Introducción

La administración eficiente de medicamentos sigue siendo uno de los principales desafíos en biomedicina, particularmente en el tratamiento de enfermedades crónicas que requieren terapias prolongadas. En los últimos años, las nanoemulsiones (NE) se han destacado como una estrategia innovadora para mejorar la solubilidad, estabilidad y biodisponibilidad de fármacos insolubles en agua, al permitir un control preciso de su liberación en el organismo (Chatzidaki & Mitsou, 2025a; Chavhan, 2025; Liu et al., 2024; More et al., 2025; Preeti et al., 2023a) .

En general, una emulsión es una dispersión coloidal compuestas por dos fases, la fase dispersa y la fase continua, esta última es aquella que se encuentra en mayor proporción y en aplicaciones biomédicas casi siempre es agua, mientras que la fase dispersa es una sustancia hidrofóbica como fármacos, aceites, lípidos entre otros. La fase dispersa se encuentra distribuida a lo largo de la fase continua en forma de pequeñas gotas; puesto que son de naturaleza opuesta tienden a separarse con el paso del tiempo, debido a esto se adiciona un agente tensoactivo, el cual es una molécula anfifílica, es decir, en su estructura tiene una parte polar que se une al agua y una no polar que tiene tendencia a unirse a la fase dispersa hidrofóbica con el objetivo de mantener la emulsión estable (es decir, sin separación entre sus fases) (Ravera et al., 2021). Además, si se reduce el tamaño de las gotas de la sustancia hidrofóbica la emulsión permanecerá estable por más tiempo. Es así como surgieron las NE, las cuales son emulsiones con un tamaño de gota entre 20 y 200 nm, aunque algunos autores sugieren que debe ser menor a 100 nm (Gupta et al., 2016). Las NE son sistemas termodinámicamente inestables, translúcidas o transparentes y presentan alta estabilidad cinética gracias al tamaño de sus gotas, lo que reduce el riesgo de separación de fases y garantiza una dispersión homogénea del sistema. Este comportamiento favorece una disponibilidad sostenida del principio activo y disminuye el uso de tensoactivos en exceso en comparación con emulsiones clásicas. De esta manera, las NEs se posicionan como una plataforma versátil para administración oral, tópica, parental o intranasal en terapias farmacéuticas modernas (Al-mohammedawi & Mollenhauer, 2022a; Pandey et al., 2020).

Las NE pueden clasificarse según la naturaleza de la fase continua, si la fase oleosa se encuentra en menor proporción dispersa en una fase acuosa, se les conoce como NE directas y se representan como (O/W) (Figura 1), cuando la fase continua está compuesta por una sustancia hidrofóbica entonces se les conoce como NE inversas y se les representa por (W/O) (Dhaval et al.,

2022) ejemplos cotidianos son la mayonesa y cremas solares entre otras.Las emulsiones bicontinuas son termodinámicamente estables y las dos fases coexisten de manera interconectadas en lugar de un líquido disperso en otro.

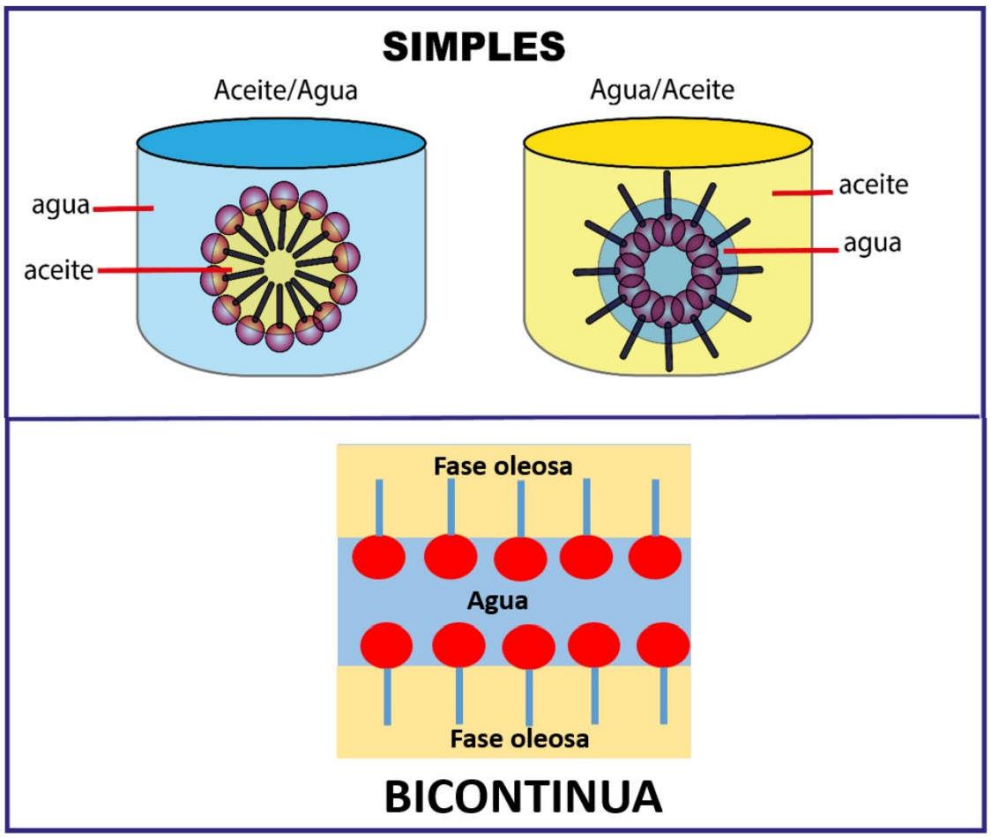


Figura 1. Tipos de nanoemulsiones directas (O/W) e inversas (W/O).

Dentro de los componentes de una NE, el agente tensoactivo o simplemente tensoactivo juega un rol fundamental, ya que es el responsable de reducir la tensión interfacial casi a cero entre la fase acuosa y la fase dispersa permitiendo una buena solubilización. Como se mencionó anteriormente, los tensoactivos en su estructura molecular tiene una parte hidrofilica, lo que los hace solubles en agua y una parte hidrofóbica lo que les da afinidad a sustancias hidrofóbicas (Kumar Shah et al., 2022). La elección adecuada del tensoactivo se basa en su balance hidrofílico-lipofílico (HBL), este representa la preferencia del tensoactivo a participar en emulsiones directas o inversas y se encuentran tabulados para la mayoría de los tensoactivos comerciales, este valor debe ser óptimo para estabilizar el tipo de emulsión deseada. Este equilibrio resulta crítico, ya que facilita la formación de una película interfacial flexible y estable, reduciendo la coalescencia y mejorando la dispersión durante el proceso de síntesis (Chatzidaki & Mitsou, 2025a; Jacob et al., 2024a).

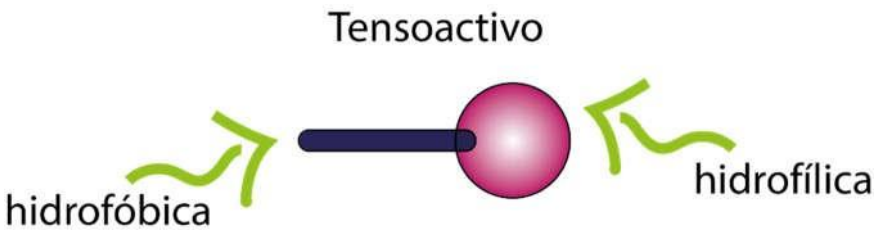


Figura 2. Estructura de una molécula de agente tensoactivo, la parte hidrofílica se le conoce como cabeza y la parte hidrofóbica como cola.

Los tensoactivos se clasifican según el tipo de carga que se encuentra en la cabeza o parte hidrofilica (Figura 3) cuando estos se encuentran disueltos en un medio acuoso, con base en eso, tenemos tensoactivos iónicos los cuales se dividen en aniónicos y catiónicos; los primeros presentan una carga negativa en el grupo polar mientras que los catiónicos tienen una carga positiva. Los tensoactivos no iónicos, son aquellos que no presentan una carga neta en el grupo polar y, finalmente, los anfóteros, su carga depende del pH del medio en el cual se encuentren por lo que pueden poseer carga positiva o negativa según el medio(Al-mohammedawi & Mollenhauer, 2022b; Nakama, 2017) .

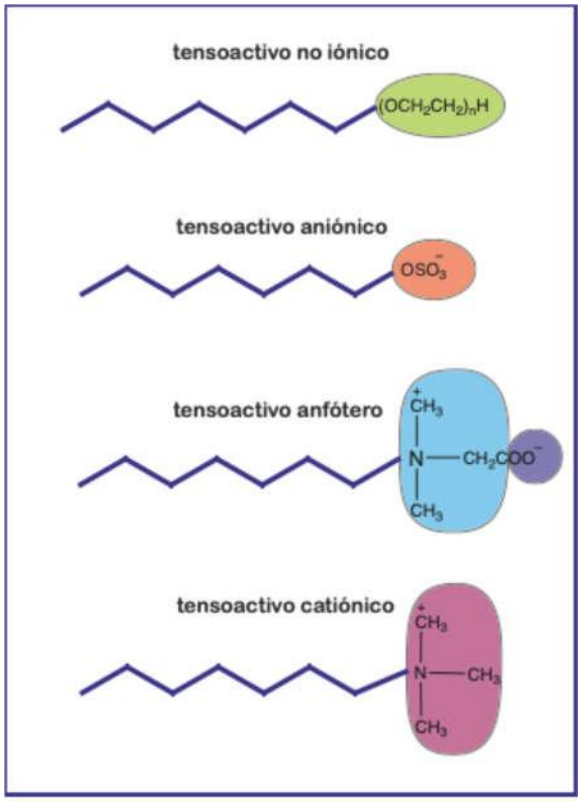


Figura 3. Clasificación de los agentes tensoactivos según la carga presente en el grupo polar cuando estos están disueltos en medio acuoso.

Métodos de síntesis de nanoemulsiones

En general, se requieren de dos pasos para obtener NE, en el primero se forma una emulsión convencional con tamaños de gota mayores a la micra, en el segundo el tamaño de gota se reduce

a menos de 200 nm. Para ello pueden seguirse dos tipos de métodos principalmente, los métodos de *alta energía* y *baja energía* (Figura 4). En los primeros se aprovecha la energía que adicionan al sistemas dispositivos o equipos especializados como homogenizadores de alta velocidad, microfluidizadores (equipos de alta presión) o equipos de ultrasonido para romper las gotas grandes de emulsión y formar las pequeñas gotas de la NE. Por otro lado, en los métodos de baja energía se realizan cambios súbitos en variables como la temperatura o concentración del sistema favoreciendo la emulsificación.

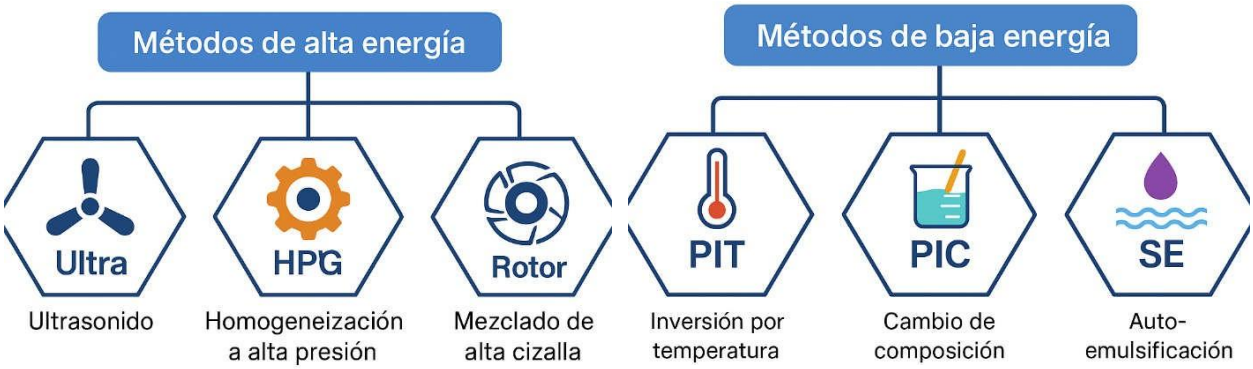


Figura 4. Métodos de síntesis de nanoemulsiones.

Métodos de alta energía:

Al utilizar los métodos de alta energía se puede lograr mayor control sobre el tamaño de gota, debido a que este es una función directa de la cantidad de energía suministrada al sistema, el número de pasos o el tiempo de exposición (Jacob et al., 2024b; Naseema et al., 2021).

Homogenización de alta presión (HPH)

Es el método más utilizado para producir NE. Esencialmente, las gotas de emulsión son forzadas a pasar a través de canales con diámetros de unos cuantos nanómetros (Figura 5) con lo cual las gotas grandes se rompen debido al cizallamiento hidráulico y alta turbulencia, generando gotas más pequeñas. El tamaño de partícula final depende del número de veces que se hace pasar a la emulsión a través de estos canales (número de pasos) y al diferencial de presión al cual es sometida la emulsión usualmente de 500 a 5000 psi (Azmi et al., 2019; Choradiya & Patil, 2021).

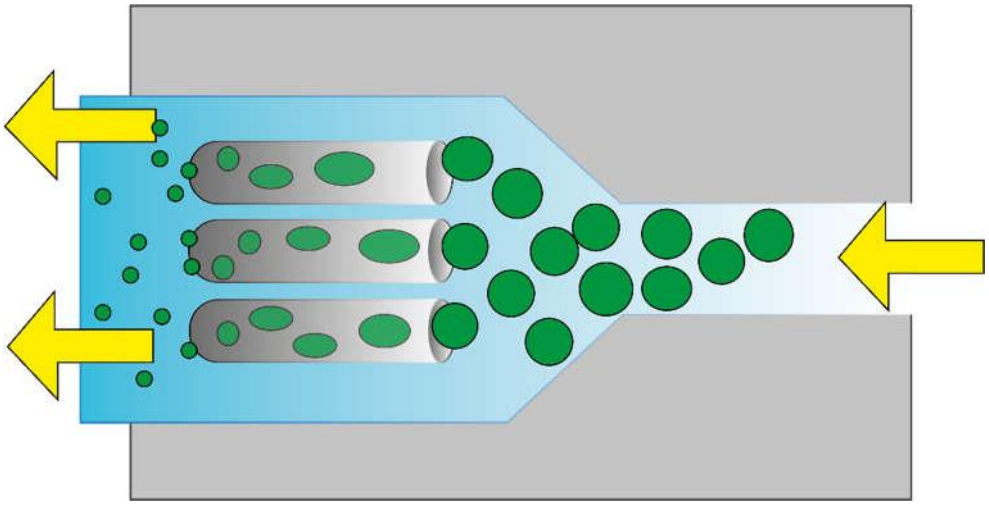


Figura 5. Ejemplo de la cámara de una microfluidizador.

Emulsificación ultrasónica

En el caso del uso de ultrasonido es un método muy utilizado para producir NE a pequeña escala, una sonda ultrasónica se introduce en la emulsión (Figura 6), la cual emite ondas ultrasónicas de 20 kHz a 100 MHz hacia las gotas de emulsión. El principio físico es utilizar las ondas y fuerzas de cavitación acústica, lo que provoca que las gotas de emulsión implosionen generando gotas pequeñas, en general, el tamaño de las NE dependerá de la frecuencia, potencia del equipo, tiempo de exposición y los componentes del sistema (Jacob et al., 2024b; Naseema et al., 2021).

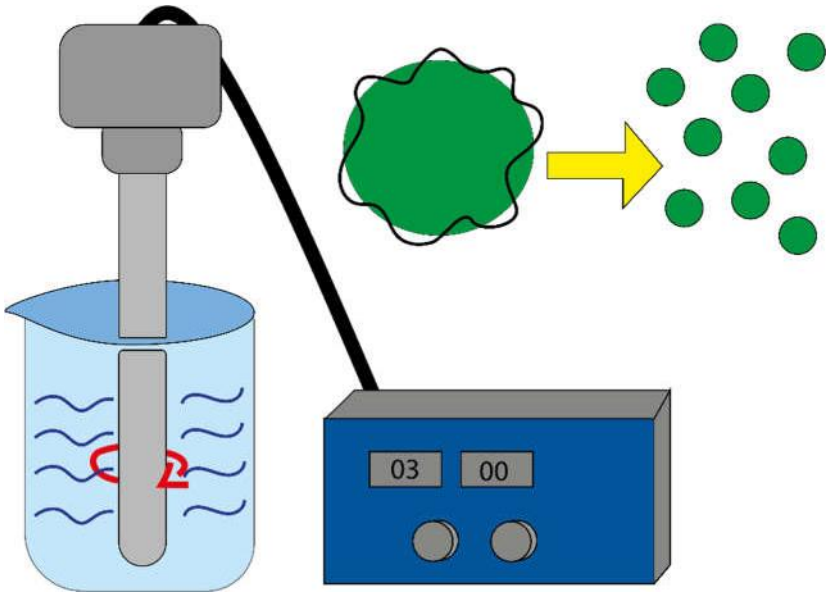


Figura 6. Ejemplo de la formación de nanoemulsiones mediante ultrasonido.

Mezclado de alta cizalla

Es un método que consiste en un rotor que gira a gran velocidad en un estator estacionario. Al girar, la emulsión se atrae directamente en la parte de arriba y será expulsada a través del estator estacionario a alta velocidad, el tamaño disminuye a medida que se agite la emulsión con mayor velocidad. Aquí las fuerzas de cizallamiento entre las gotas de la emulsión es lo que genera su

rompimiento (Azmi et al., 2019). Actualmente, este método ha adquirido gran interés a escala industrial y sobre todo en procesos continuos donde se evitan los tiempos muertos que se presentan en la producción por lotes de los otros métodos.

Métodos de baja energía:

Los métodos de baja energía se basan en fenómenos de autoensamblaje espontáneo inducidos por cambios de temperatura, composición, fuerza iónica, presión o pH. Entre los más conocidos se encuentran el método de inversión de fases por cambio en la temperatura (PIT, de sus siglas en inglés Phase Inversion Temperature**)** y el método de inversión de fase por cambio en la composición (PIC, Phase Inversion Composition). Estos procedimientos requieren menor energía y son útiles para encapsular compuestos termosensibles (Busmann et al., 2020; Cholakova et al., 2022). Al igual que en los métodos de alta energía las NE se obtienen en dos pasos. Se parte de una emulsión y se somete a un cambio súbito en las variables antes mencionadas para la formación espontánea de las NE.

Método de inversión de fases por cambio en la temperatura

Este método aprovecha el comportamiento térmico de los tensoactivos no iónicos de tipo polietoxilado, cuyo valor de HLB se ve afectado en gran medida por la temperatura: a baja temperatura son más hidrofílicos, y a alta temperatura se vuelven lipofílicos. Afectando la curvatura espontánea de la monocapa interfacial, generando NE directas (O/W) a baja temperatura o, inversas (W/O) a altas temperaturas y una fase bicontinua en el punto intermedio, alcanzando el equilibrio hidrofílico-lipofílico (HLB) (Azmi et al., 2019; Choradiya & Patil, 2021). En este método se parte de una emulsión de composición constante y posteriormente se somete a un calentamiento hasta alcanzar la temperatura HLB, en la cual se forma una fase bicontinua, si se hace descender súbitamente la temperatura se favorece la emuslificacion de pequeñas gotas de la fase hidrofóbica, entre mayor sea la disminución de temperatura menor será el tamaño de gota (Figura 7). Una gran ventaja de esta técnica consiste en que el tamaño de gota que se obtiene es bastante uniforme.

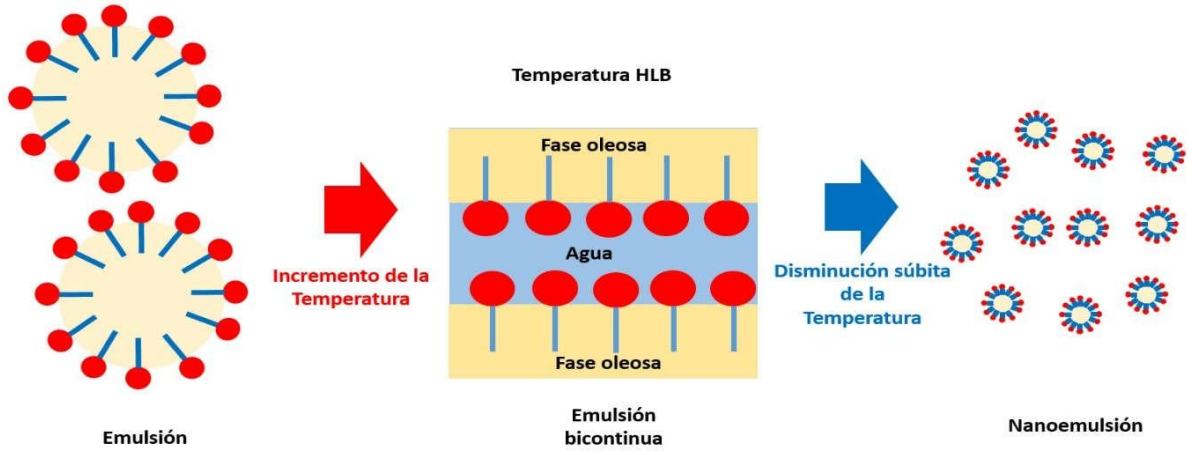


Figura 7. Formación de nanoemulsiones mediante la técnica PIT.

Método de Inversión de fases por cambio en la composición

Este método implica el cambio de una emulsión del tipo O/W a W/O o viceversa. En la mayoría de los casos se parte de una emulsión inversa, que contiene a la fase hidrofóbica/tensoactivo y un

poco de agua, posteriormente, se adiciona lentamente una mayor cantidad de agua a una temperatura constante lo que genera una emulsión bicontinua, si se continúa adicionando agua al sistema este se invierte de manera espontánea formando una NE directa (Figura 8) (Azmi et al., 2019; Naseema et al., 2021).

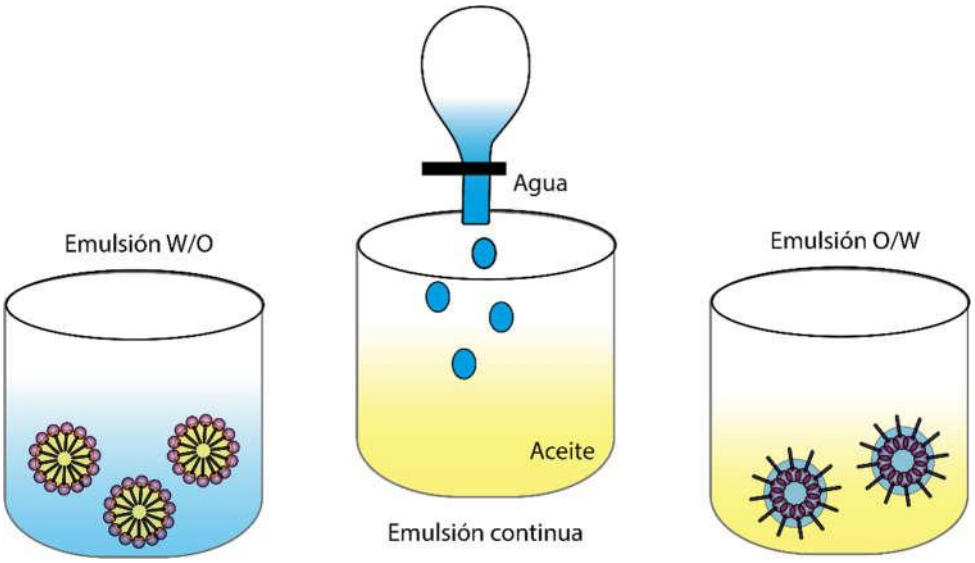


Figura 8. Formación de nanoemulsiones mediante la técnica PIC.

Emulsión espontánea

Este método se desarrolla a temperatura ambiente y sin necesidad de un equipo especial. Actualmente, no se lleva a cabo a nivel industrial, esta limitado a una baja concentración de fase hidrofóbica y depende de la zona de transición de fase, concentración y tensión interfacial. Básicamente, consiste en mezclar una solución de fase hidrofóbica y tensoactivo con una disolución acuosa de cotensoactivos, la alta afinidad del tensoactivo por el monómero o el agua induce turbulencia en ambas fases, porovocando la ruptura de gotas. Para obtener NE, es importante activar la turbulencia interfacial mediante cotensoactivos, estos son sustancias como alcoholes de 6 a 8 carbonos, acetona o alcanos, a diferencia de los tensoactivos los cotensoactivos no forman estructuras micelares, sus moléculas se ubican entre las moléculas del tensoactivo para evitar la difusión de la fase hidrofóbica (Choradiya & Patil, 2021; Preeti et al., 2023b).

Caracterización de nanoemulsiones

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Esta técnica permite evaluar tamaño, distribución y morfología de las nanopartículas. Durante la preparación de la muestra, el secado puede provocar encogimiento y alteraciones estructurales. Además, las muestras no conductoras, tienden a acumular carga bajo el haz de electrones, distorsionando las imágenes; por lo que, se aplica un recubrimiento conductor ultradelgado (oro) (Preeti et al., 2023b). En un SEM, se utiliza un conjunto de lentes electromagnéticos para concentrar un haz de electrones sobre la superficie de la muestra, ajustando el enfoque mediante la variación de la corriente eléctrica aplicada en las bobinas que generan el campo magnético (Zhou et al., 2007). Un conjunto de bobinas de escaneo desplaza el haz de electrones enfocado sobre la muestra en un patrón de barrido (raster), mientras se recopilan diversas

señales (electrones secundarios, retrodispersados y rayos X característicos) para generar contraste y formar una imagen (Figura 9) (Yablon & Libera, 2019).

Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

Es una de las técnicas más adecuadas y ampliamente utilizadas para caracterizar nanoemulsiones, ofreciendo una resolución a nivel atómico (~ 10 nm) y una visualización de su estructura. Una muestra ultrafina es irradiada con un haz de electrones (Figura 10), cuyas interacciones con la muestra generan electrones transmitidos, dispersados, difractados y en mucho menor medida secundarios. El TEM permite determinar con precisión la morfología, tamaño y estructura de las partículas de NE. Si bien genera imágenes bidimensionales, la tomografía electrónica posibilita reconstrucciones tridimensionales de las muestras (Agrawal et al., 2024). La técnica por análisis de TEM es considerada una técnica absoluta para medir el tamaño y su distribución asi como la morfología de las partículas puesto que pues ver completamente las mismas. Sin embargo, el TEM tiene los mismos problemas que un ojo humano, por ejemplo, miopía y astigmatismo, por lo que es necesario un mantenimiento preventivo frecuente para tener un equipo en óptimas condiciones.

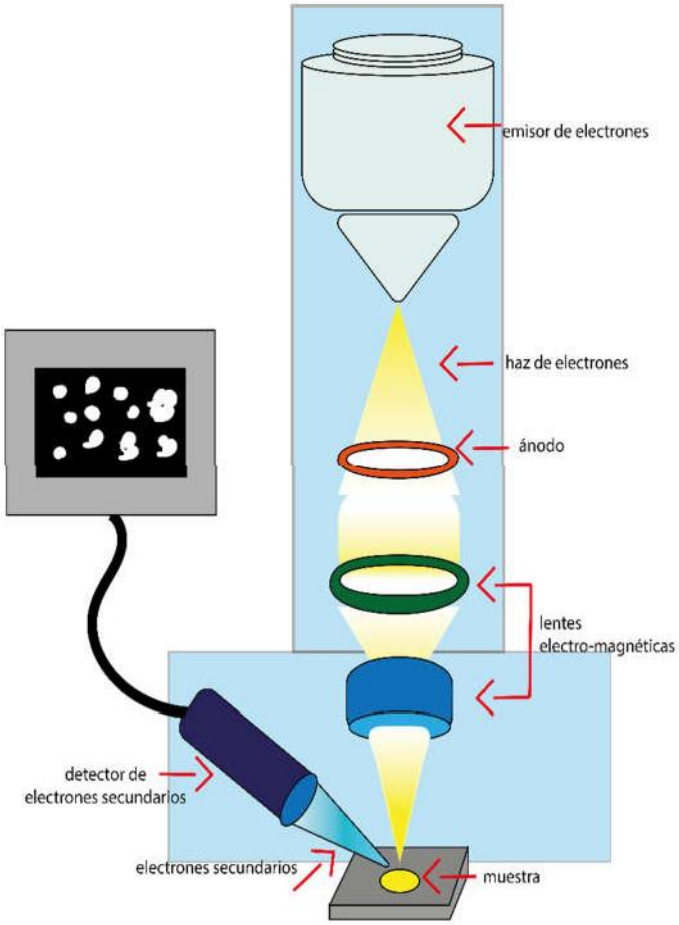


Figura 9. Esquema del microscopio electrónico de barrido (SEM).

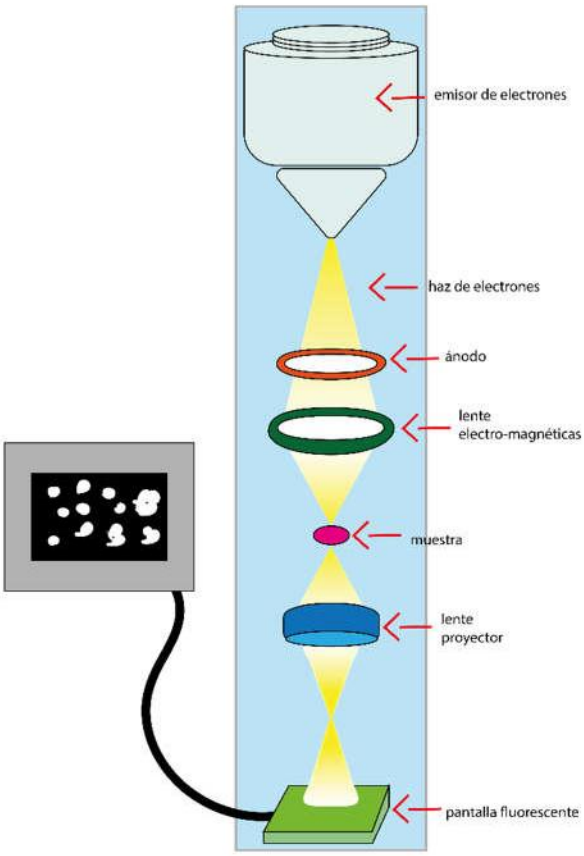


Figura 10. Esquema del microscopio electrónico de transmisión (TEM).

Dispersión dinámica de luz (DLS)

Esta es una técnica rápida no invasiva ampliamente utilizada para determinar el tamaño promedio y la distribución de partículas en sistemas coloidales, como las NE. Cuando un haz de láser como fuente de luz impacta sobre la muestra (0) las partículas dispersan la luz en diferentes direcciones, un detector registra la variación en la intensidad de la luz dispersada en función del tiempo (se mueven más rápido si son más pequeñas y viceversa). El análisis matemático permite estimar el diámetro hidrodinámico y, en algunos casos, el índice de polidispersidad (es decir, que tan homogéneas en tamaño son). Su precisión puede verse afectada por alta polidispersidad o agregación (Rodriguez-Loya et al., 2023). Las muestras a analizar deberán ser diluidas lo suficiente para evitar el fenómeno de redispersion y aunque es una técnica relativa suele ser bastante útil y con buena precisión.

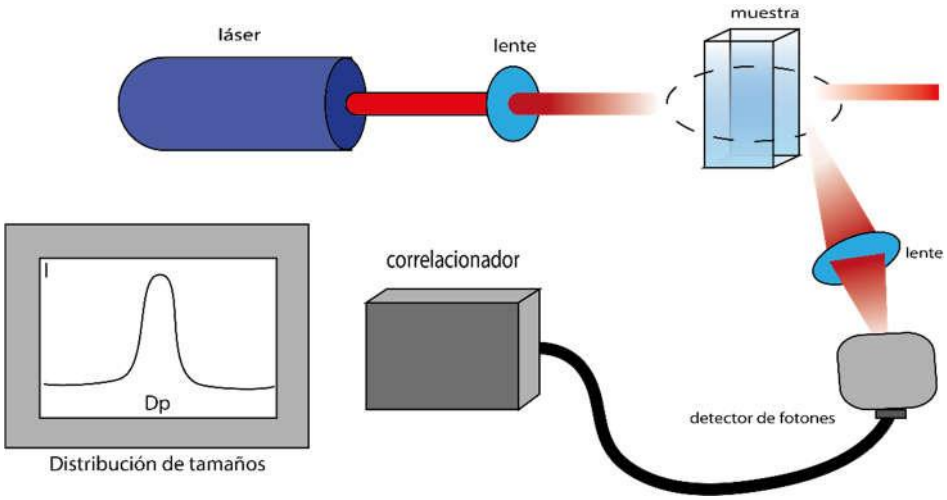


Figura 11. Esquema del funcionamiento del dispersor de luz dinámica.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica termoanalítica empleada para medir la cantidad de calor que una muestra absorbe o libera mientras se somete a una variación controlada de temperatura. En este método, se utiliza una referencia, la cual consiste en una capsula vacía. La capsula de la muestra y la referencia se colocan en una cámara bajo atmosfera inerte sobre discos termoeléctricos, conectados a un sistema de flujo de calor, lo que permite transferir de forma controlada la energía térmica desde el calefactor hasta las celdas como se muestra en la Figura 12 (Bogaert et al., 2004). Esta técnica proporciona información detallada sobre transiciones térmicas, tales como puntos de fusión, cristalización, transiciones vítreas y procesos de degradación. En el caso de las NE, el DSC puede emplearse para evaluar su estabilidad térmica, ya que cualquier cambio en la estructura molecular del sistema puede reflejarse como una señal en el termograma (KV et al., 2014). Es una técnica económica no invasiva que permite obtener información de la estabilidad y pureza de materiales, cuando un fármaco se introduce sobre las gotas de NE puede ser confirmado por esta técnica con buena precisión.

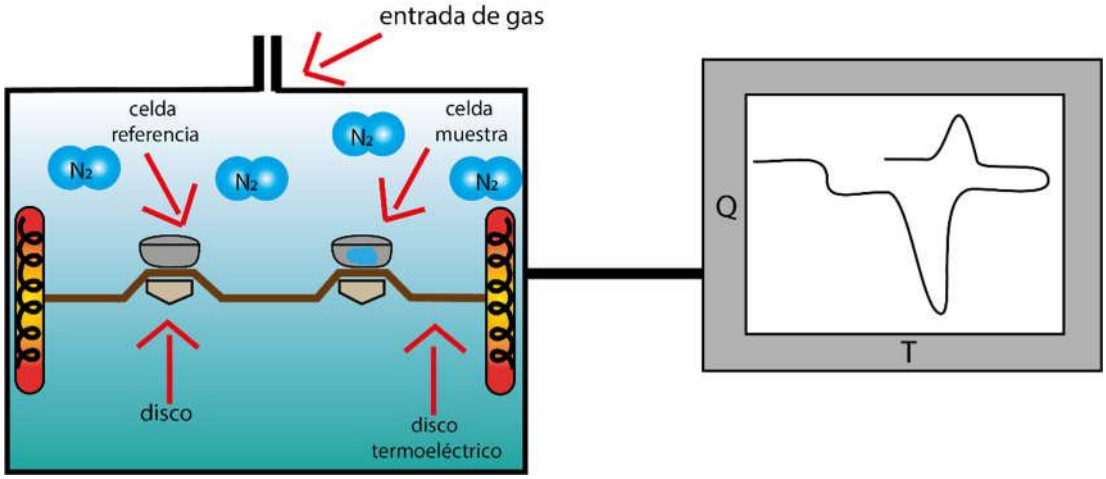


Figura 12. Esquema del calorímetro diferencial de barrido.

Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Es una técnica que mide las frecuencias de luz infrarroja absorbidas por una muestra. Utiliza un interferómetro de Michelson, donde un haz de infrarrojo se divide (Figura 13) y genera un interferograma. Esto se convierte en un espectro de absorción por medio de una transformada de Fourier (Johnson et al., 1992). Cada enlace químico absorbe radiación a frecuencias específicas, generando un espectro ("huella digital"). Esta técnica resulta muy útil para confirmar la presencia de grupos funcionales y para detectar cambios en la estructura química de las NE; después de procesos de encapsulación o liberación controlada (Johnson et al., 1992; Preeti et al., 2023b). Es una técnica económica, no invasiva y puede aplicarse a muestras solidas y liquidas. Además, puede llevarse a cabo de distintas formas, como son en forma de películas o pastillas.

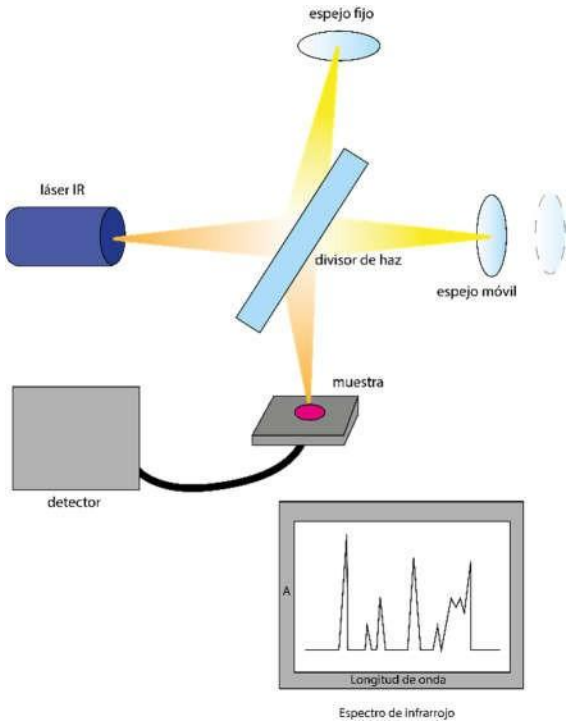


Figura 13. Esquema del espectrofotómetro de Infrarrojo.

Aplicaciones de nanoemulsiones en la liberación de fármacos

Actualmente, las NE se están aplicando en diversas áreas, por ejemplo, en la industria de polímeros actúan como plantillas para la síntesis de partículas poliméricas aplicadas en adhesivos, barnices, pinturas entre otras. En la industria de alimentos se emplean como medios de transporte para saborizantes y otras sustancias, se emplean también en la agricultura como transporte de sustancias activas como fertilizantes y pesticidas entre otras. Sin embargo, la aplicación más trascendente ha sido como sistemas de liberación de fármacos. El comportamiento de las NE para que sean eficaces en sistemas biológicos depende de factores fisicoquímicos como el tamaño, la superficie, el tensoactivo empleado y el solvente. El primero de ellos es crítico, ya que partículas de ~50nm muestran mayor captación celular (Wilson et al., 2022). Las nanoemulsiones pueden administrarse por diversas vías, tópica, intravenosa, oral, ocular, intramuscular, intranasal.

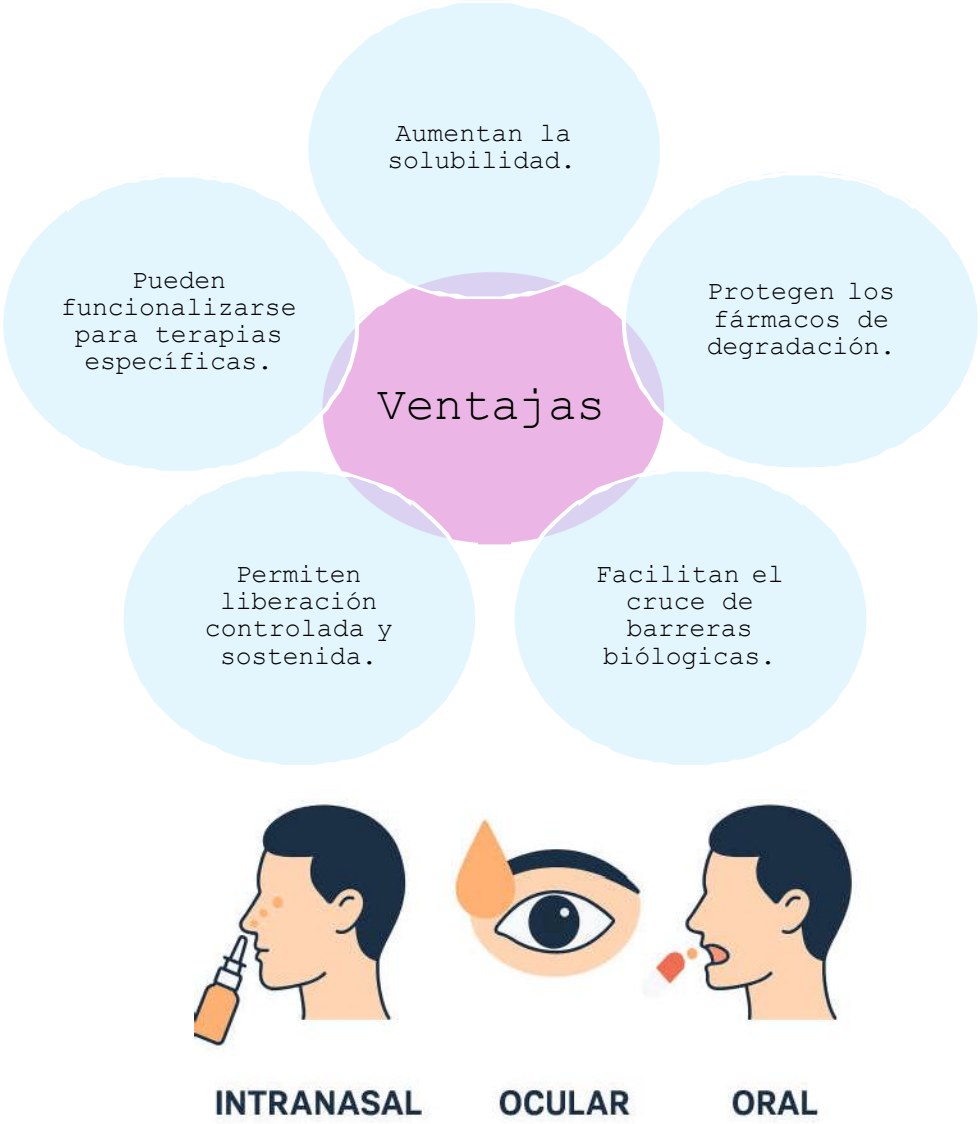


Figura 14. Tipos de aplicaciones de las NE en la liberación de fármacos.

Administración vía oral

A pesar de los múltiples desafíos inherentes al tracto gastrointestinal (TGI), tales como la degradación enzimática, el pH y la limitada permeabilidad intestinal, las NE han emergido como una estrategia prometedora para la administración oral de compuestos bioactivos. No obstante, el perfil toxicológico de estás formulaciones, influenciado por el contenido de tensoactivos, requiere de una evaluación cuidadosa para garantizar la seguridad y biocompatibilidad del sistema (Chatzidaki & Mitsou, 2025a). Las NE han demostrado ser sistemas eficaces para mejorar la biodisponibilidad oral de diversos fármacos, como Candesartán Cilexetil (formulado con Tween® 80/Solutol® HS-15 en fase oleosa de Capryol™ PGMC), mostrando una biodisponibilidad 10 veces mayor que su formulación convencional; el Paclitaxel (con aceite de triglicéridos de cadena media y tensoactivos Labrasol®/TPGS), alcanzando un 70% de biodisponibilidad oral y el ibuprofeno (en aceite de oliva con sucroésteres) duplicando su biodisponibilidad (Vitória Minzoni de Souza Iacia et al., 2024).

El uso de curcumina y emodina para el tratamiento de la enfermedad inflamatoria intestinal es prometedor debido a los efectos de reparación de la mucosa antiinflamatoria e intestinal. Las nanoemulsiones fueron cargadas con quitosana y alginato de sodio, mostraron estabilidad en el líquido gástrico simulado y colapsando en el líquido colónico simulado, en conclusión, pueden desintegrarse en el colón mejorando el microambiente inflamatorio del colón (Lei et al., 2023).

Administración vía ocular

El ojo humano es todo un desafío para la administración de medicamentos debido a las barreras oculares presentes. El reto hoy en día es cambiar la perspectiva científica para superar cada barrera ocular; barreras estáticas, dinámicas y metabólicas dependiendo el entorno. Para la obtención de excipientes que nos ayuden a penetrar esas barreras, se debe tomar en cuenta un medicamento que sea lipofílico, la formulación final deber isotónica con pH cercano a los fluidos fisiológicos (Suri et al., 2020). Se debe garantizar la compatibilidad farmacéutica e interacción efectiva con la película lagrimal. Los tensoactivos en las NE reducen el ángulo de contacto entre la gota y la córnea, mejorando la retención ocular. Un ejemplo, son los tensoactivos catiónicos, los cuales logran mayor adhesión (Chatzidaki & Mitsou, 2025b; Singh et al., 2020).

Las NE oftálmicas con tamaño de gota $\leq$200 nm mejoran la permeación corneal, facilitando el acceso al abrir uniones estrechas entre células epiteliales. Presentan carga superficial positiva, lo que prolonga la retención en la mucina ocular por interacciones electrostáticas, y su capacidad de gelificación rápida, aumentando la resistencia al drenaje lagrimal (Chatzidaki & Mitsou, 2025b).

Administración vía intranasal

Actualmente, la entrega de medicamentos intranasales ha demostrado ser una vía eficaz para la administración de las formas de dosificación. Siendo la mucosa nasal una vía terapéuticamente idónea para eludir las barreras que impiden la entrega directa de fármacos en el sitio exacto. La región olfativa de las mucosas nasales sirve como un vínculo directo entre la nariz y el cerebro, como la enfermedad de Alzheimer, la migraña, la depresión, la esquizofrenia, la enfermedad de Parkinson y la meningitis se tratan con NE cargadas con medicamentos (Preeti et al., 2023b).

Las NE mejoran significativamente la administración nasal de fármacos debido a su pequeño tamaño y su composición lipídica, lo que le permite interactuar con las membranas celulares y facilitar el transporte transcelular. Su naturaleza modificable favorece una mayor adhesión a la mucosa nasal y una liberación sostenida del fármaco, prolongando su tiempo de residencia hasta 12-16 h, en contraste con las formulaciones convencionales que son eliminadas en apenas 4 h. Estudios demuestran que el tamaño óptimo de partícula (80-200 nm) no solo mejora la absorción del fármaco, sino que también optimiza su distribución en la cavidad nasal, reduciendo la frecuencia de dosificación requerida. Estas características hacen de las NE un sistema prometedor para la administración nasal de medicamentos, combinando mayor eficacia terapéutica con una posología más conveniente para los pacientes (Abdulla et al., 2021).

Conclusiones

El uso de nanoemulsiones en diversas áreas ya está completamente desarrollado y algunos métodos de síntesis se llevan a cabo a nivel industrial, actualmente, se trabaja en mejorar y eficientar estos procesos de obtención y, en buscar escalar a nivel industrial otros procesos. También, se busca mejorar los tipos de tensoactivos empleados para hacerlos biodegradables, con menor impacto ambiental y, en ciertos casos que sean compatibles con el cuerpo humano casi en du totalidad. Sin lugar a dudas desde principios de su formulación (década de los 80) hasta la fecha siguen siendo un campo de estudio de gran interés y que promete seguir brindando oportunidades en muchas áreas.

Referencias

Abdulla, N. A., Balata, G. F., El-ghamry, H. A., & Gomaa, E. (2021). Intranasal delivery of Clozapine using nanoemulsion-based in-situ gels: An approach for bioavailability enhancement. *Saudi Pharmaceutical Journal*, *29*(12), 1466–1485. https://doi.org/10.1016/J.JSPS.2021.11.006

Agrawal, M., Prasad, V. V. S. H., Nijhawan, G., Jalal, S. S., Rajalakshmi, B., & Dwivedi, S. P. (2024). A Comprehensive Review of Electron Microscopy in Materials Science: Technological Advances and Applications. *E3S Web of Conferences*, *505*. https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202450501029

Al-mohammedawi, A., & Mollenhauer, K. (2022a). Current Research and Challenges in Bitumen Emulsion Manufacturing and Its Properties. In *Materials* (Vol. 15, Issue 6). MDPI. https://doi.org/10.3390/ma15062026

Al-mohammedawi, A., & Mollenhauer, K. (2022b). Current Research and Challenges in Bitumen Emulsion Manufacturing and Its Properties. *Materials 2022, Vol. 15, Page 2026*, *15*(6), 2026. https://doi.org/10.3390/MA15062026

Azmi, N. A. N., Elgharbawy, A. A. M., Motlagh, S. R., Samsudin, N., & Salleh, H. M. (2019). Nanoemulsions: Factory for Food, Pharmaceutical and Cosmetics. *Processes 2019, Vol. 7, Page 617*, *7*(9), 617. https://doi.org/10.3390/PR7090617

Bogaert, G. A., Goeman, L., Ridder, D. De, Wevers, M., Ivens, J., & Schuermans, A. (2004). The physical and antimicrobial effects of microwave heating and alcohol immersion on catheters that are reused for clean intermittent catheterisation. *European Urology*, *46*(5), 641–646. https://doi.org/10.1016/J.EURURO.2004.06.016

Busmann, E. F., Martínez, D. G., Lucas, H., & Mäder, K. (2020). Phase inversion-based nanoemulsions of medium chain triglyceride as potential drug delivery system for parenteral applications. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, *11*, 213–224. https://doi.org/10.3762/BJNANO.11.16

Chatzidaki, M. D., & Mitsou, E. (2025a). Advancements in Nanoemulsion-Based Drug Delivery Across Different Administration Routes. In *Pharmaceutics* (Vol. 17, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17030337

Chatzidaki, M. D., & Mitsou, E. (2025b). Advancements in Nanoemulsion-Based Drug Delivery Across Different Administration Routes. *Pharmaceutics 2025, Vol. 17, Page 337*, *17*(3), 337. https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS17030337

Chavhan, R. (2025). Nanosuspensions: Enhancing drug bioavailability through nanonization. *Annales Pharmaceutiques Françaises*, *83*(2), 251–271. https://doi.org/10.1016/J.PHARMA.2024.06.003

Cholakova, D., Vinarov, Z., Tcholakova, S., & Denkov, N. (2022). Self-emulsification in chemical and pharmaceutical technologies. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, *59*. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2022.101576

Choradiya, B. R., & Patil, S. B. (2021). A comprehensive review on nanoemulsion as an ophthalmic drug delivery system. *Journal of Molecular Liquids*, *339*, 116751. https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2021.116751

Dhaval, M., Vaghela, P., Patel, K., Sojitra, K., Patel, M., Patel, S., Dudhat, K., Shah, S., Manek, R., & Parmar, R. (2022). Lipid-based emulsion drug delivery systems — a comprehensive review. *Drug Delivery and Translational Research*, *12*(7), 1616–1639. https://doi.org/10.1007/S13346-021-01071-9/TABLES/4

Gupta, A., Eral, H. B., Hatton, T. A., & Doyle, P. S. (2016). Nanoemulsions: formation, properties and applications. *Soft Matter*, *12*(11), 2826–2841. https://doi.org/10.1039/C5SM02958A

Jacob, S., Kather, F. S., Boddu, S. H. S., Shah, J., & Nair, A. B. (2024a). Innovations in Nanoemulsion Technology: Enhancing Drug Delivery for Oral, Parenteral, and Ophthalmic Applications. *Pharmaceutics 2024, Vol. 16, Page 1333*, *16*(10), 1333. https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS16101333

Jacob, S., Kather, F. S., Boddu, S. H. S., Shah, J., & Nair, A. B. (2024b). Innovations in Nanoemulsion Technology: Enhancing Drug Delivery for Oral, Parenteral, and Ophthalmic Applications. *Pharmaceutics 2024, Vol. 16, Page 1333*, *16*(10), 1333. https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS16101333

Johnson, D. J., Compton, D. A. C., & Canale, P. L. (1992). Applications of simultaneous DSC/FTIR analysis. *Thermochimica Acta*, *195*(C), 5–20. https://doi.org/10.1016/0040-6031(92)80042-U

Kumar Shah, S., Chakraborty, G., Bhattarai, A., & De, R. (2022). Synergistic and antagonistic effects in micellization of mixed surfactants. In *Journal of Molecular Liquids* (Vol. 368). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120678

KV, K., SR, A., PR, Y., RY, P., & VU, B. (2014). Differential Scanning Calorimetry: A Review. *Research & Reviews: Journal OfÂ Pharmaceutical Analysis*, *3*(3), 11–22. https://www.rroij.com/open-access/differential-scanning-calorimetry-a-review-.php?aid=34700&utm_source=chatgpt.com

Lei, F., Zeng, F., Yu, X., Deng, Y., Zhang, Z., Xu, M., Ding, N., Tian, J., & Li, C. (2023). Oral hydrogel nanoemulsion co-delivery system treats inflammatory bowel disease via anti-inflammatory and promoting intestinal mucosa repair. *Journal of Nanobiotechnology*, *21*(1), 1–19. https://doi.org/10.1186/S12951-023-02045-4/FIGURES/7

Liu, Y., Liang, Y., Yuhong, J., Xin, P., Han, J. L., Zhu, R., Zhang, M., Chen, W., Ma, Y., Du, Y., & Yu, X. (2024). Advances in Nanotechnology for Enhancing the Solubility and Bioavailability of Poorly Soluble Drugs. *Drug Design, Development and Therapy*, *18*, 1469. https://doi.org/10.2147/DDDT.S447496

More, S. M., Rashid, M. A., Kharwade, R. S., Taha, M., Alhamhoom, Y., Elhassan, G. O., Gangane, P., Asar, T. O., Pise, A., Kaleem, M., & Mujtaba, M. A. (2025). Development of Solid Self-Nanoemulsifying Drug Delivery System of Rhein to Improve Biopharmaceutical Performance: Physiochemical Characterization, and Pharmacokinetic Evaluation. *International Journal of Nanomedicine*, *20*, 267. https://doi.org/10.2147/IJN.S499024

Nakama, Y. (2017). Surfactants. *Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications*, 231–244. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802005-0.00015-X

Naseema, A., Kovooru, L., Behera, A. K., Kumar, K. P. P., & Srivastava, P. (2021). A critical review of synthesis procedures, applications and future potential of nanoemulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, *287*, 102318. https://doi.org/10.1016/J.CIS.2020.102318

Pandey, P., Gulati, N., Makhija, M., Purohit, D., & Dureja, H. (2020). Nanoemulsion: A Novel Drug Delivery Approach for Enhancement of Bioavailability. *Recent Patents on Nanotechnology*, *14*(4), 276–293. https://doi.org/10.2174/1872210514666200604145755

Preeti, Sambhakar, S., Malik, R., Bhatia, S., Al Harrasi, A., Rani, C., Saharan, R., Kumar, S., Geeta, & Sehrawat, R. (2023a). Nanoemulsion: An Emerging Novel Technology for Improving the Bioavailability of Drugs. *Scientifica*, *2023*. https://doi.org/10.1155/2023/6640103

Preeti, Sambhakar, S., Malik, R., Bhatia, S., Al Harrasi, A., Rani, C., Saharan, R., Kumar, S., Geeta, & Sehrawat, R. (2023b). Nanoemulsion: An Emerging Novel Technology for Improving the Bioavailability of Drugs. *Scientifica*, *2023*(1), 6640103. https://doi.org/10.1155/2023/6640103

Ravera, F., Dziza, K., Santini, E., Cristofolini, L., & Liggieri, L. (2021). Emulsification and emulsion stability: The role of the interfacial properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, *288*, 102344. https://doi.org/10.1016/J.CIS.2020.102344

Rodriguez-Loya, J., Lerma, M., & Gardea-Torresdey, J. L. (2023). Dynamic Light Scattering and Its Application to Control Nanoparticle Aggregation in Colloidal Systems: A Review. *Micromachines 2024, Vol. 15, Page 24*, *15*(1), 24. https://doi.org/10.3390/MI15010024

Singh, M., Bharadwaj, S., Lee, K. E., & Kang, S. G. (2020). Therapeutic nanoemulsions in ophthalmic drug administration: Concept in formulations and characterization techniques for ocular drug delivery. *Journal of Controlled Release*, *328*, 895–916. https://doi.org/10.1016/J.JCONREL.2020.10.025

Suri, R., Beg, S., & Kohli, K. (2020). Target strategies for drug delivery bypassing ocular barriers. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, *55*, 101389. https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2019.101389

Vitória Minzoni de Souza Iacia, M., Eduarda Ferraz Mendes, M., Cristiny de Oliveira Vieira, K., Cristine Marques Ruiz, G., José Leopoldo Constantino, C., da Silva Martin, C., Eloizo Job, A., Alborghetti Nai, G., & Kretli Winkelstroter Eller, L. (2024). Evaluation of curcumin nanoemulsion effect to prevent intestinal damage. *International Journal of Pharmaceutics*, *650*, 123683. https://doi.org/10.1016/J.IJPHARM.2023.123683

Wilson, R. J., Li, Y., Yang, G., & Zhao, C. X. (2022). Nanoemulsions for drug delivery. *Particuology*, *64*, 85–97. https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.05.009

Yablon, D., & Libera, M. (2019). Microscopy 101: Scanning Probes or Scanning Electrons: A Practical Guide to Select a Method for Nanoscale Characterization. *Microscopy Today*, *27*(6), 32–38. https://doi.org/10.1017/S1551929519001044

Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., & Joy, D. (2007). Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM). *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*, 1–40. https://doi. org/10.1007/978-0-387-39620-0_1

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

BIOMEDICA

Recibido 25 Jun. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 29 Sep. 2025

Implementación de sistema para el estudio de reflejos pupilares con estímulos de colores azul y blanco.

Implementation of a system for the study of pupillary reflexes using blue and white color stimuli.

Rodrigo Hernandez Moncayo[1]

rhernandezm403@alumno.uaemex.mx

Asdrúbal López Chau

Carlos Omar González Morán

Ernesto Suaste Gómez

Jose de Jesus Agustin Flores Cuautle

Juan Carlos Belen Luna

[1] C.U. UAEMEX Valle de México

Resumen: El presente trabajo describe la implementación de un sistema de video-oculografía (VOG) y pupilometría para medir reflejos pupilares en 20 voluntarios (21 ± 3 años) bajo estímulos de luz azul y blanca en un ambiente controlado, aunque es una muestra muy pequeña los resultados demuestran que el sistema puede ser útil para obtener datos pupilares teniendo una evaluación positiva tanto el sistema como la infraestructura empleada. Se utilizaron tres estímulos de 10 ms con intervalos de 10 s, registrando áreas pupilares entre 3000 y 9000 píxeles, con contracciones máximas de 3000-5000 píxeles. Los resultados muestran que la luz azul induce contracciones ligeramente más pronunciadas (PCA promedio: 444-449 píxeles²) que la luz blanca (PCA promedio: 410-417 píxeles²), con una disminución en la respuesta pupilar post-iluminación (PIPR) en el tercer ciclo debido a fatiga de las células ganglionares intrínsecamente fotosensibles (ipRGCs). Este sistema proporciona una base de datos preliminar para futuros estudios con inteligencia artificial, para identificar biomarcadores potenciales para desordenes oculares del sistema parasimpático.

Palabras clave: Pupilometría, reflejo pupilar, luz azul, luz blanca, video-oculografía, ipRGC, biomarcadores

Abstract: This work describes the implementation of a video-oculography (VOG) and pupillometry system to measure pupillary reflexes in 20 volunteers (21 ± 3 years old) under blue and white light stimuli in a controlled environment. Although the sample size is small, the results demonstrate that the system can effectively obtain pupillary data, showing positive evaluations for both the system and the infrastructure used. Three 10 ms light stimuli were applied at 10 s intervals, recording pupil areas between 3000 and 9000 pixels, with maximum contractions ranging from 3000 to 5000 pixels. The results show that blue light induces slightly stronger contractions (average PCA: 444–449 pixels²) than white light (average PCA: 410–417 pixels²), with a decrease in the post-illumination pupillary response (PIPR) during the third cycle due to fatigue of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs). This system provides a preliminary database for future studies using artificial intelligence to identify potential biomarkers for ocular or parasympathetic system disorders.

Keywords: Pupillometry, pupillary reflex, blue light, white light, video-oculography, ipRGC, biomarkers

1 Introducción

La visión es un sentido primordial para los seres vivos, facilitando la adquisición de conocimiento y el desarrollo eficiente de procesos cognitivos esenciales para el aprendizaje autónomo. Dada su relevancia, se han desarrollado metodologías no invasivas para el estudio de la respuesta pupilar a estímulos luminosos, como la video-oculografía y la pupilometría (Blandino Ortiz & Higuera Lucas, 2022; Martínez-Ricarte et al., 2013). Los ojos son la principal vía de información sensorial hacia el cerebro, con más del 80% de los datos transmitiéndose a través de estímulos visuales que las células retinianas convierten en señales electroquímicas para su interpretación.

Aplicaciones principales de la video-oculografía y pupilometría abarcan el área de la medicina, para evaluar enfermedades del sistema nervioso y afecciones ya que pueden estar relacionadas con diversos biomarcadores (Christofi, 2022). En la pupilometría se permite observar y calcular la respuesta pupilar a la iluminación, sin ningún límite de edad, analizando los efectos ante distintas frecuencias de luz visible (Martínez-Ricarte et al., 2013).

El estudio del reflejo pupilar ha avanzado significativamente para determinar diversas afecciones; en Zarifkar et al., (2024), analizaron la respuesta reflejo pupilar apagado (PLO) en pacientes que presentan trastornos agudos de la conciencia. Por otro lado, Barry et al., (2022) desarrollaron un pupilómetro basado en un smartphone utilizando luz infrarroja, roja, verde y azul (RGB) con el fin de monitorear de forma remota la salud de personas mayores e investigación clínica.

En los estudios de pupilometría constantemente es usada la luz RGB debido a que tienen un impacto en la excitación de las células ganglionares fotosensibles (ipRGCs) que se encuentran en la retina, por ello se estudia su aplicación en distintas enfermedades. En el trabajo de Tan et al., (2022), se evalúa la pupilometría portátil utilizada para detección de glaucoma y la evaluación de alteraciones neurales en pacientes con diabetes mellitus tipo 2, ambos utilizando estímulos de luz de color rojo y azul. Además, se han empleado métodos basados en wavelets y algoritmos de Machine Learning para diagnosticar el TDAH a través de la dinámica pupilar durante tareas cognitivas (Vimalajeewa et al., 2022).

A pesar de los avances en pupilometría para la detección y análisis de patologías, la literatura actual carece de estudios específicos sobre el PLR (Pupillary Light Reflex) en la población mexicana**,** donde se utilicen sistemas de video-oculografía con espectros de luz en color azul y blanco. Los trabajos previos, si bien demuestran la utilidad de la pupilometría, no exploran las particularidades de la respuesta pupilar bajo estas condiciones lumínicas ni establecen una base de datos local para futuros estudios con Inteligencia Artificial.

En este contexto, este documento presenta la implementación y evaluación de un sistema de video-oculografía y pupilometría que emplea estímulos de luz azul y blanca para estudiar sus efectos en el PLR de estudiantes del Centro Universitario UAEMEX Valle de México. Nuestro objetivo es obtener el cálculo de la contracción pupilar y generar una base de datos específica que sirva como punto de partida para investigaciones posteriores con apoyo de la Inteligencia Artificial. Este enfoque, no solo permitirá conocer la idoneidad de la infraestructura para este tipo de experimentos en el entorno universitario, sino que también sentará las bases para futuras aplicaciones diagnósticas y de monitoreo adaptadas a nuestra población.

El artículo se estructura comenzando con un resumen del funcionamiento de la pupila y los fotorreceptores, seguido de la metodología e implementación del modelo VOG para la obtención de los reflejos pupilares, y concluyendo con los resultados y hallazgos clave de esta investigación.

2 La Pupila y los Fotorreceptores

El ojo es una semiesfera compuesta por diversos elementos externos e internos que, en conjunto, forman un sistema complejo que permite la visión. En su centro se encuentra el iris, una membrana

pigmentada que define el color característico del ojo. Justo en el centro del iris está la pupila, un orificio que, aunque a simple vista parece un pequeño círculo, reacciona según la cantidad de luz ambiental. Su diámetro oscila entre 2 y 8 mm, con un promedio de 3.5 mm. Es importante señalar que existen variaciones individuales y condiciones que pueden afectar la apariencia y función de la pupila (Conti, Battaglini & Mora, 2010).

El diámetro pupilar se ajusta gracias a dos músculos, el esfínter y el dilatador de la pupila, controlados por el sistema nervioso autónomo (vía parasimpática y simpática). La vía aferente envía información sobre la cantidad de luz al cerebro, y la vía eferente transmite las órdenes para regular el tamaño pupilar. Específicamente, la vía parasimpática provoca la miosis (contracción) en respuesta a una gran cantidad de luz, mientras que la vía simpática induce la midriasis (dilatación) en condiciones de luz baja, permitiendo el paso de más luz para mejorar la visión (Quiroz-González et al., 2021).

Dentro de la retina se localiza la mácula, responsable de la formación de imágenes y del reconocimiento de colores y formas, con una conexión directa a los nervios ópticos para el envío de información. En el centro de la mácula se encuentra la fóvea, crucial para la visión central, que contiene los fotorreceptores y las células ganglionares intrínsecamente fotosensibles (ipRGC). Los conos permiten la visión central y diurna o fotópica, siendo sensibles a las longitudes de onda roja (564–580 nm), verde (534–545 nm) y azul (420–440 nm). Por otro lado, los bastones son responsables de la visión periférica en condiciones de poca luz o visión escotópica, y no detectan colores, solo escalas de gris (Graue Wiechers, 2019).

La luz azul y blanca ha sido empleada en numerosos estudios para detectar diversas enfermedades. A continuación, se presenta un resumen de trabajos que demuestran la importancia del estudio de la pupilometría aplicada con estos colores.

2.1 Aplicaciones de la Luz Azul y Blanca en Pupilometría

En el ámbito de las enfermedades degenerativas, Kuze et al. (2021), realizaron un estudio que examinó la respuesta pupilar posterior a la iluminación (PIPR) provocada por estímulos de luz azul y blanca. Su investigación se centró en afecciones oculares relacionadas con las cataratas y en el uso de lentes intraoculares selectivos (IOL) diseñadas para filtrar la luz azul. Este trabajo demostró las implicaciones de la luz azul y blanca en las IOL, además de abordar la reducción de la sensibilidad a la luz azul atribuida al envejecimiento y a la formación de cataratas.

Para el caso de las enfermedades neurodegenerativas, Chougule et al. (2019), analizaron cómo las respuestas PIPR se alteran en pacientes con enfermedad de Alzheimer en comparación con individuos sanos. En este estudio se observó como los pacientes tienen una respuesta pupilar PIPR diferente ante los estímulos de luz blanca en comparación con luz azul. Estos hallazgos proporcionan información sobre biomarcadores en la progresión de la enfermedad y el deterioro del sistema nervioso autónomo

En cuanto a la depresión, se ha evaluado la PIPR como biomarcador de la sensibilidad al color azul en pacientes con Episodio Depresivo Mayor. En este estudio se resalta la importancia de la luz blanca en pacientes con esta condición y en la sensibilidad que sufren sus células ipRGCs que ralentiza su PIPR. En esta investigación se recomienda fototerapia de luz azul, además de medicación auxiliar, en apoyo para el tratamiento de este trastorno.

De acuerdo con los estudios mencionados, se encontró que:

- **PIPR para luz azul:** En color azul tiene el efecto de producir respuestas de recuperación pupilares más pronunciadas que en otros colores RGB debido a que estas son más sensibles a este tipo de luz (Kuze et al. (2021)

- **PIPR para luz blanca:** La intensidad que se produce en PIPR por la luz blanca no es tan intensa como la de la luz azul, dado que esta abarca un espectro de varias longitudes de onda de luz visible (que oscila entre 400 nm y 700 nm) que son necesarias para su percepción en el ojo (Maruani et al., 2025).
- **PIPR** en sus distintas recciones al interactuar con diferentes longitudes de luz visible pueden medirse y, obtener información que permite encontrar biomarcadores para evaluar la salud en general además de la función neurológica a través de las células ipRGC. Por lo que esta información se ha ocupado en el desarrollo de tratamientos y dispositivos médicos (Chougule et al., 2019).

En México existe un problema de salud pública respecto a problemas visuales que tienen influencia relacionadas con catarata senil, glaucoma, diabetes entre otras (Secretaría de Salud, 2020). Además, según reportes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), después de la pandemia de COVID-19 ha aumentado los casos de depresión en la población mayor de 60 años (Instituto Nacional de Estadística y Geografía,2023). Por ello es importante mediante el estudio de la pupila, implementar técnicas que puedan prevenir enfermedades, y evitar complicaciones severas.

2.2 Propuesta de Investigación

Al analizar las investigaciones previas, es importante destacar que, para el estudio de la aplicación de los estímulos con los colores azul y blanco en la pupila, se ha tomado en cuenta la relevancia de estas longitudes de onda de luz visible, para llevar a cabo una investigación inicial que permita conocer sus efectos en un ambiente controlado y sus futuras aplicaciones en la búsqueda de biomarcadores para diversas patologías con la ayuda de la Inteligencia Artificial.

En este trabajo, se obtuvo una base de datos que permitió el estudio del PLR en los colores azul y blanco. Para lograrlo, se midió la velocidad de reacción partiendo del Diámetro Pupilar Basal (BPD), que es el tamaño de la pupila antes de la estimulación. Posteriormente, se calculó la contracción hasta su punto más bajo (PCA: Pupil Constriction Amplitude) y, finalmente, el PIPR ya mencionado anteriormente.

3 Metodología e Infraestructura

La metodología, infraestructura y el cálculo del área pupilar para este estudio se basaron en la investigación de Belen-Luna et al. (2024), quienes implementaron un sistema para obtener reflejos pupilares con colores RGB.

Para este caso en específico, el enfoque inicial fue la construcción de un sistema de video-oculografía (VOG) para documentar los reflejos pupilares. Posteriormente, los datos de estas grabaciones se analizaron para eliminar posibles fotogramas viciados, como parpadeos continuos, cambios bruscos de iluminación o acomodamiento natural del ojo. A continuación, se implementó un algoritmo de visión artificial en Python con OpenCV para detectar y calcular el área pupilar, guardando estos datos en un archivo CSV de Excel. Esta información es esencial para generar las series de tiempo pupilar y calcular el tiempo de contracción para cada estímulo.

3.1 Configuración Experimental

Para la implementación del sistema VOG se utiliza una jaula de Faraday que está cubierta para evitar iluminación externa. En el centro del techo de la jaula, se instaló una tira LED de luz blanca de 6000K regulable (110V), calibrada a 1.61 cd/m². Esta iluminación de fondo crea un ambiente que permite al ojo del sujeto de prueba adaptarse gradualmente a la penumbra, minimizando la incomodidad a los estímulos de luz durante la experimentación.

El registro del PLR se realizó con una cámara réflex Canon EOS T6 Rebel, utilizada para capturar video en alta definición (HD) a 60 FPS (Fotogramas por Segundo). La cámara fue equipada con un lente macro Canon de 50mm y tres adaptadores macro adicionales (16, 21 y 32 mm), permitiendo tomas de gran acercamiento. El sistema fotográfico es colocado sobre un sistema deslizable que ayuda al ajuste en el enfoque. Tomando como base el lente macro se colocó un anillo de luz infrarroja (IR) para iluminar la grabación en la penumbra de la jaula, pero sin afectar el PLR ya que este no se encuentra en un rango visible para el ojo.

Frente a la cámara, se colocó un soporte de mentón oftalmológico ajustable en altura, diseñado para posicionar al sujeto de prueba de manera cómoda y estable. Durante la grabación, el sujeto se sentó frente a este soporte, enfocando la captura en el ojo izquierdo. La configuración experimental descrita se ilustra en la **Figura 1**.

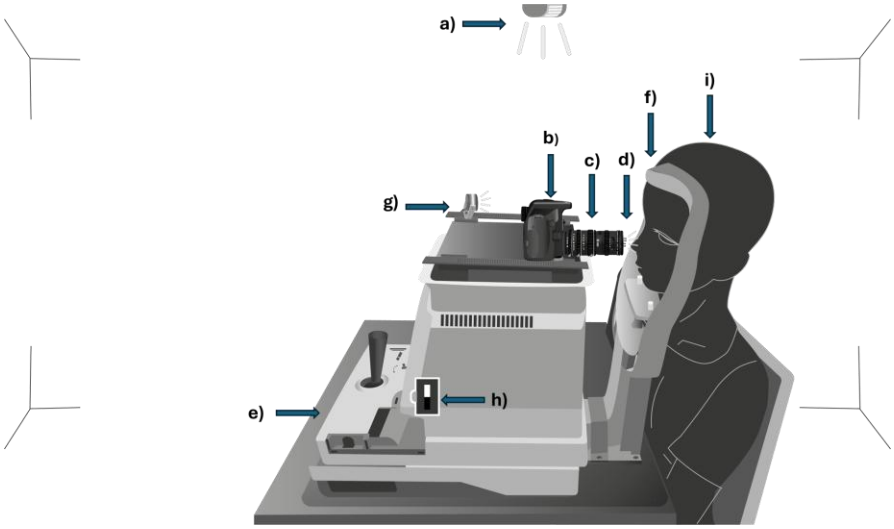


Figura 1. Representación gráfica de la disposición espacial de los elementos necesarios para la obtención de los estímulos pupilares: a) iluminación de fondo, b) cámara, c) lente macro, d) anillo de luz IR, e) base deslizable, f) base oftalmológica, g) estímulo, h) control de estímulos i) sujeto de estudio (S).

Protocolo de Estimulación y Adquisición de Datos.

La estimulación pupilar se realizó mediante un LED RGBW de 1W, calibrado a 20 cd/m² para cada color (azul y blanco) y se posicionó a 29.8 cm del ojo derecho del sujeto de prueba. Para su calibración se usó un fotómetro COHERENT modelo IL400.

El protocolo de experimentación consistió en:

- Envío de tres estímulos lumínicos por cada color (azul y blanco).
- Cada estímulo tuvo una duración de 10 milisegundos.
- Se estableció un intervalo de 10 segundos entre cada disparo de luz. Durante este intermedio, no se realizó grabación (el anillo IR permaneció apagado) para facilitar la recuperación pupilar tras el estímulo.
- La captura de datos se llevó a cabo primero con el color azul, seguida de un período de 2 minutos de recuperación para el sujeto, antes de proceder con el registro para el color blanco. Este ciclo se repitió para cada participante.

3.2 Metodología y Procesamiento de Datos

El procesamiento de las grabaciones de video se realizó en dos etapas principales:

Primera Etapa: Preprocesamiento.

Inicialmente, se lleva a cabo la obtención de los fotogramas del video, descartando las tomas correspondientes a los intermedios de grabación. También se eliminaron los fotogramas que presentan parpadeos muy marcados o cambios significativos en la posición de la pupila, los cuales pueden deberse al proceso natural de acomodación ocular o al cansancio del sujeto de prueba, estos inconvenientes son llamados artefactos y la evaluación de estos permite utilizar solo los fotogramas donde se vea la pupila correctamente, para evitar errores en la medición de las series de tiempo.

Posteriormente, se inicia el análisis individual de cada fotograma mediante un algoritmo de visión artificial para obtener el área pupilar basado en estas dos etapas y se muestra gráficamente en la **Figura 2**:

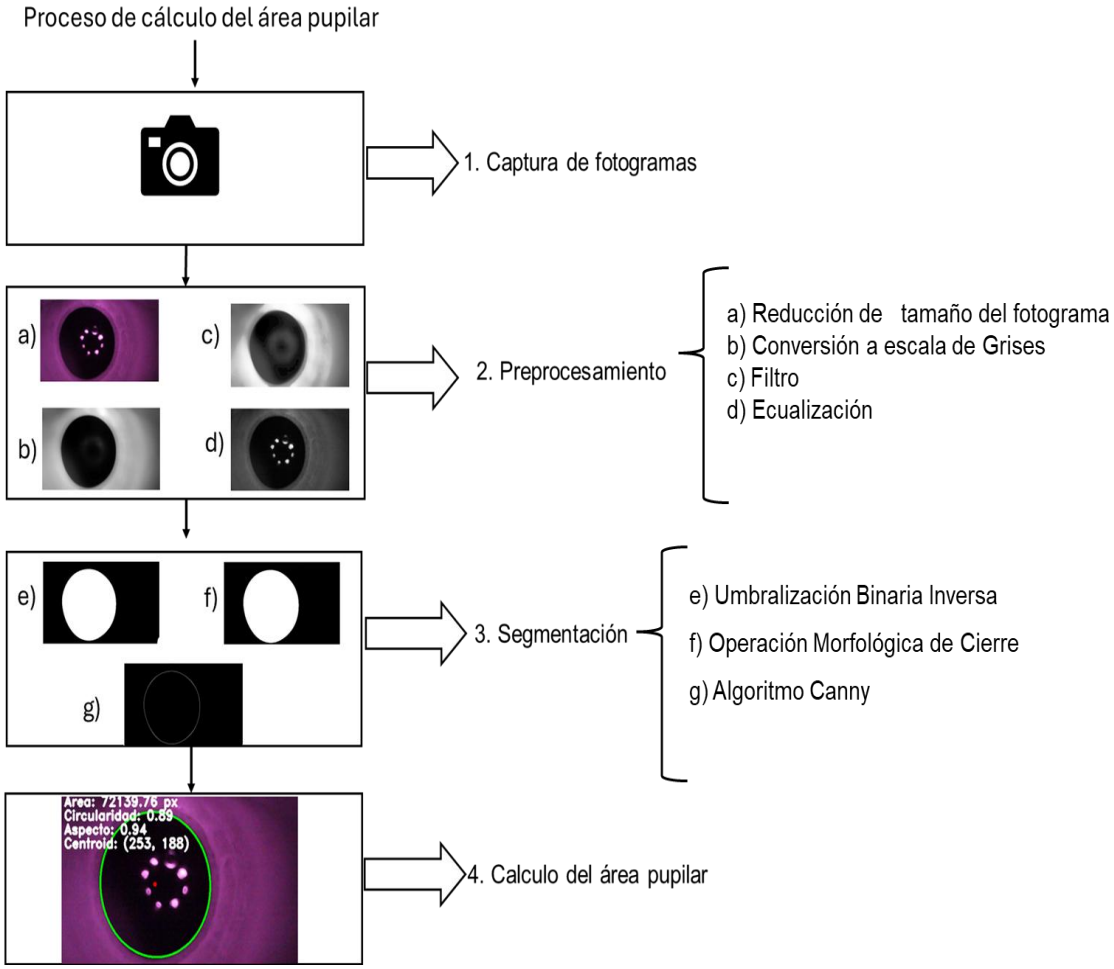


Figura 2. Algoritmo para procesamiento de imágenes y detección del área pupilar donde corresponden a los siguientes pasos 1. Captura de fotogramas, 2. Preprocesamiento, 3. Segmentación, 4. Cálculo de área.

- **Redimensionamiento:** Se ajusta el tamaño de la imagen de 1280 x 720 a la mitad que seria 640 x 360 pixeles para optimizar el procesamiento. No afecta ya que la escala de la

imagen es equivalente a la calibración de la toma. Para los cálculos posteriores esta conversión se toma en cuenta para evitar problemas de medición en el área y velocidad.

- **Conversión a escala de grises:** Cada imagen se convierte a escala de grises. Esto elimina la información de color y, crucialmente, minimiza el reflejo de la luz infrarroja (IR), permitiendo centrarse únicamente en la intensidad de los píxeles para la detección pupilar.
- **Filtrado:** La imagen en escala de grises se filtra para suavizarla y reducir el ruido, preservando al mismo tiempo los bordes relevantes de la pupila.
- **Ecualización de fotograma:** Finalmente, se ecualiza la imagen filtrada para realzar las regiones más oscuras, lo que facilita la posterior segmentación de la pupila.

Segunda Etapa: Segmentación. En la segunda etapa, se procede con la **segmentación** de la pupila:

- **Umbralización Binaria Inversa:** Se aplica una umbralización binaria inversa para que la sección interna al borde que representa la pupila aparezca en color blanco y la parte externa se convierta en un color negro.
- **Operación Morfológica de Cierre:** Sobre la imagen umbralizada, se realiza una operación morfológica de cierre para rellenar posibles huecos y suavizar el contorno que representa el perímetro de la pupila.
- **Algoritmo Canny:** Para delimitar con precisión los contornos externos de la pupila, se emplea el algoritmo de detección de bordes Canny.
- **Cálculo del Área Pupilar:** Una vez que los contornos están definidos, se procede al cálculo del área pupilar. Este cálculo se realiza utilizando la Ecuación 1, y el resultado del área se expresa en píxeles cuadrados.

$$A = \pi \left(\frac{eje\ mayor}{2}\right)\left(\frac{eje\ menor}{2}\right) \tag{1}$$

El procesamiento de los datos se realizó en el lenguaje de programación **Python**, empleando las librerías **OpenCV** para la identificación de la pupila por medio de visión artificial y **SciPy** para los cálculos científicos.

Criterios de Análisis para implementación de sistema VOG:

- **Detección pupilar**: El algoritmo identifica la pupila en cada fotograma obtenido del video. Se aplican técnicas de umbralización y detección de contornos para aislar la región pupilar.
- **Cálculo del área pupilar**: Una vez detectada la pupila, se calcula su área en píxeles.
- **Series de tiempo pupilar**: Los datos del área pupilar a lo largo de los distintos fotogramas o frames, estos se organizan en series de tiempo para cada estímulo, lo que permite observar la dinámica de contracción y dilatación este fenómeno se puede observar en la Figura 3 y Figura 4.
- **Cálculo de la velocidad de contracción**: Se determinará la velocidad de respuesta pupilar desde el último punto del diámetro basal hasta el punto de máxima contracción.
- **Cálculo de la velocidad de recuperación:** Se calcula el tiempo de PIPR desde el punto de máxima contracción hasta el punto de recuperación basal.

Para la experimentación, se consideró una muestra de 20 voluntarios, compuesta por 10 mujeres y 10 hombres, con edades de 21 ± 3 años. Aderman et al. (2024) y Fan et al. (2009) identificaron diferencias en la respuesta pupilar entre hombres y mujeres, aunque con efectos pequeños y

dependientes del contexto. Dado que esta investigación no tiene fines diagnósticos ni de análisis por género, dichas diferencias no serán consideradas.

Se utilizó un muestreo no probabilístico, ya que la selección se basó en la accesibilidad de un grupo específico para la investigación. Aunque la muestra es limitada, se espera que los datos preliminares obtenidos sean significativos y proporcionen información valiosa para el futuro de la investigación.

Con el fin de mantener la confidencialidad de los participantes, se les asignó una etiqueta alfanumérica. Por ejemplo, los sujetos se identificaron como 'SB', donde 'S' corresponde a 'sujeto' y 'B' al color blanco. Luego se añadió el número del sujeto (por ejemplo, SB1, SB2, ..., SB20).

Todos los participantes firmaron un formulario de consentimiento informado donde se les detalló el tipo de experimentación a realizar y los datos que se recopilarían a través de un cuestionario. Este proceso se adhiere a la Declaración de Helsinki, y el protocolo de estudio fue presentado y aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad Autónoma del Estado de México, bajo el registro número 007.2023.

Criterios de Inclusión y Exclusión. Entre los principales criterios establecidos en el protocolo para la participación en la experimentación se encuentran:

- No haber consumido analgésicos o antidepresivos previamente a la prueba.
- No haber experimentado ataques epilépticos.
- No haber consumido sustancias alcohólicas o recreativas antes de la prueba.
- Haber ingerido el primer alimento del día.

Características de la Muestra Preliminar. Entre los sujetos de estudio, se observaron las siguientes condiciones reportadas:

- **45%** de los sujetos reportaron visión borrosa.
- **70%** manifestó presentar fatiga ocular.
- **80%** refirió haber tenido falta de sueño.

4 Resultados

Series de Tiempo de la Respuesta Pupilar

La **Figura 3**, muestra las series de tiempo de la respuesta pupilar de los 20 sujetos al estímulo de **color blanco**. En el eje horizontal, denominado FPS, el rango aproximado es de 0 a 350, mientras que el eje vertical, etiquetado como "Área pupilar (píxeles^2)", registra valores entre 3000 y 9000 píxeles

Cada sujeto de estudio está representado por una serie de tiempo con un color diferente (rojo, verde, azul, naranja, entre otros 16 colores), que ilustra el comportamiento de la pupila frente a los tres estímulos, etiquetados como "contracción 1", "contracción 2" y "contracción 3". Al inicio de cada contracción, se observa un período sin cambios significativos en la pupila, conocido como **tiempo BPD (Diámetro Pupilar Basal)**.

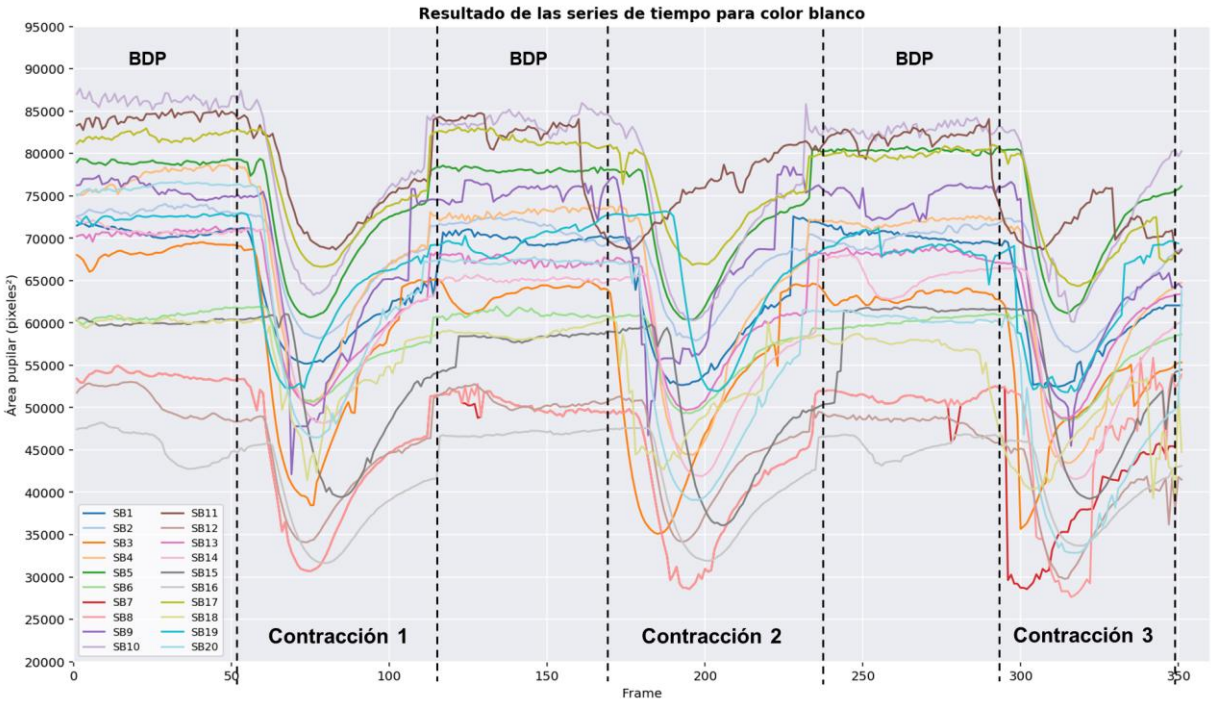


Figura 3. Se muestran los resultados para las series de tiempo de la respuesta pupilar de 20 sujetos al estímulo de color blanco.

Cada estímulo provoca una contracción rápida de la pupila, seguida de una recuperación más lenta hasta alcanzar gradualmente un estado estable. Los valores previos al descenso reflejan el BPD, y los mínimos indican el punto de máxima contracción (PCA). Las variaciones entre las diferentes series son notables; por ejemplo, se observan contracciones muy profundas en sujetos como SB3 y menos profundas en SB8, lo que subraya las diferencias individuales entre cada participante.

La **Figura 4**, presenta los resultados de las series de tiempo para el estímulo de **color azul**. En este caso, los sujetos se identifican como 'SA' (Sujeto Azul, por ejemplo, SA1, SA2, ..., SA20). Se mantuvo la correspondencia de color de las series de tiempo con las utilizadas para el estímulo blanco. De manera similar, se observa el tiempo BPD antes de cada una de las tres contracciones. En estas series, SA11 muestra una contracción menos profunda, mientras que SA19 exhibe una disparidad muy marcada con respecto a las demás muestras, lo cual se atribuye principalmente a parpadeos o fatiga durante la captura del video.

Es importante destacar que los resultados no siempre se presentan de forma homogénea debido a la dificultad inherente de mantener el ojo en una posición constante durante la grabación. Fenómenos como el parpadeo, el esfuerzo muscular para mantener el ojo abierto, la acomodación natural de la pupila y los cambios de iluminación pueden influir. Además, existen variaciones individuales y condiciones que afectan la apariencia y función pupilar. Cuando estos fenómenos son muy marcados, se descartan en el análisis de los fotogramas; sin embargo, pequeñas contracciones debidas al estrés son comunes y se mantienen. Otros factores influyentes incluyen la edad y, como se reveló en el cuestionario de conformidad, la notoria ausencia de sueño en muchos participantes (debido a sus actividades como estudiantes) y que el 45% de los sujetos reportaron problemas para enfocar objetos.

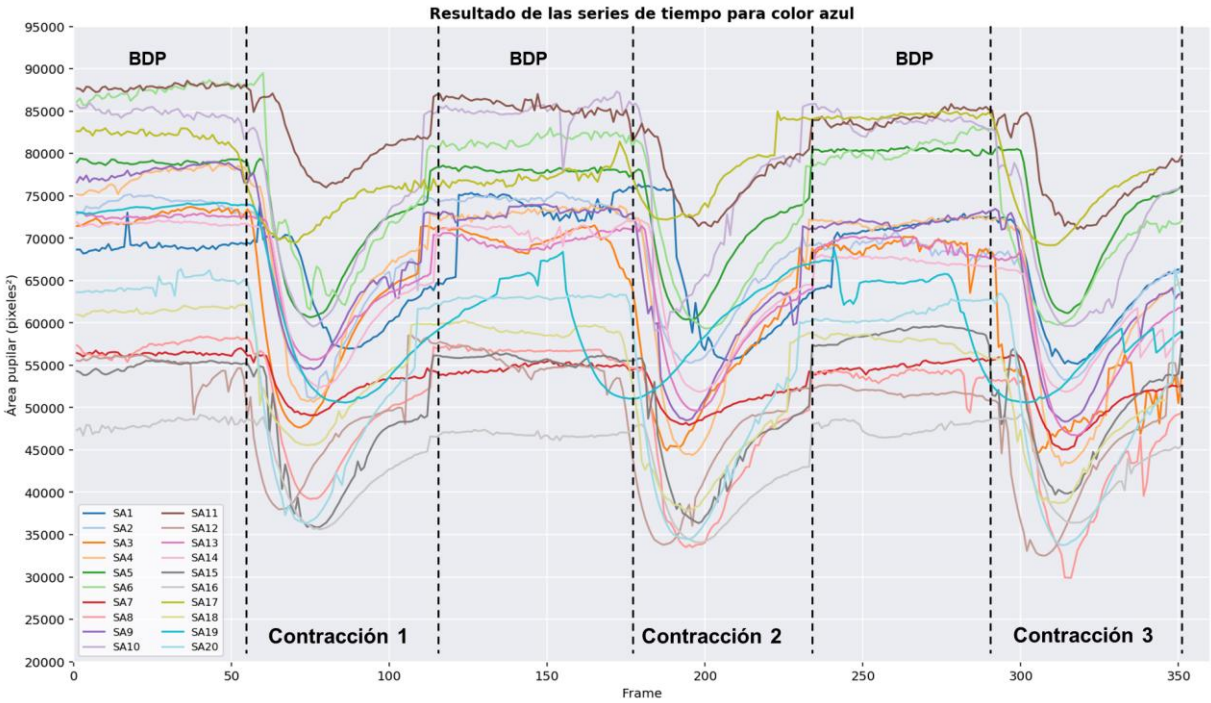


Figura 4. Se muestran los resultados para las series de tiempo de la respuesta pupilar de 20 sujetos al estímulo de color azul

Aunque se pueden realizar análisis complejos sobre el comportamiento diverso de la pupila en cada sujeto, este artículo se enfoca en presentar la medición de la velocidad de contracción y la velocidad de recuperación para cada una de las tres contracciones registradas por sujeto.

4.1 Cálculo de la Velocidad de Contracción y Recuperación

Para determinar las velocidades de contracción y recuperación, se aplicó el filtro de Savitzky-Golay a cada una de las señales pupilares (Schafer, 2011). Este filtro suaviza los datos utilizando un método de mínimos cuadrados, lo que permite eliminar el ruido (artefactos) mientras preserva características importantes como picos y valles, evitando así errores en el cálculo de la velocidad sin alterar la forma general de la respuesta pupilar (Espinosa, Roig, Pérez, & Mas, 2015; Fan & Yao, 2010; Ren, Barreto, Gao, & Adjouadi, 2012).

Para obtener los valores de las velocidades de contracción y recuperación muchos de los trabajos existentes al utilizar aparatos oftalmológicos especializados solo presentan los resultados obtenidos y no la forma de como obtuvieron los cálculos (Pinheiro & da Costa, 2021). Sin embargo, para obtener los valores nos basamos en el trabajo de Bremner (2012), adecuando la forma de obtener los resultados referentes a la velocidad de PCA y PIPR.

Velocidad de Contracción: Para calcular la velocidad de contracción, el algoritmo detecta los picos mínimos (que corresponden a las contracciones máximas) y los picos máximos (que preceden a la contracción). Se seleccionan los tres mínimos más pronunciados y, para cada uno, se identifica el máximo anterior como el inicio del proceso de contracción. La **Figura 5**, presenta las gráficas resultantes de la aplicación del filtro de Savitzky-Galay y el algoritmo descrito, mostrando la Amplitud de Contracción Pupilar (PCA) para los estímulos blanco y azul en el Sujeto 8 (SB8, SA8) y el Sujeto 20 (SB20, SA20). En estas gráficas, se observan claramente los puntos de inicio (marcados en azul) y los puntos de máxima contracción (marcados en rojo) para ambos sujetos.

Aunque el BPD no siempre es lineal, las mínimas contracciones no impiden diferenciar el inicio de cada PCA. Cada PCA está delimitada por líneas punteadas que marcan el inicio de la contracción y líneas continuas que indican la contracción más profunda, utilizando color rojo (PCA1), verde (PCA2) y violeta (PCA3).

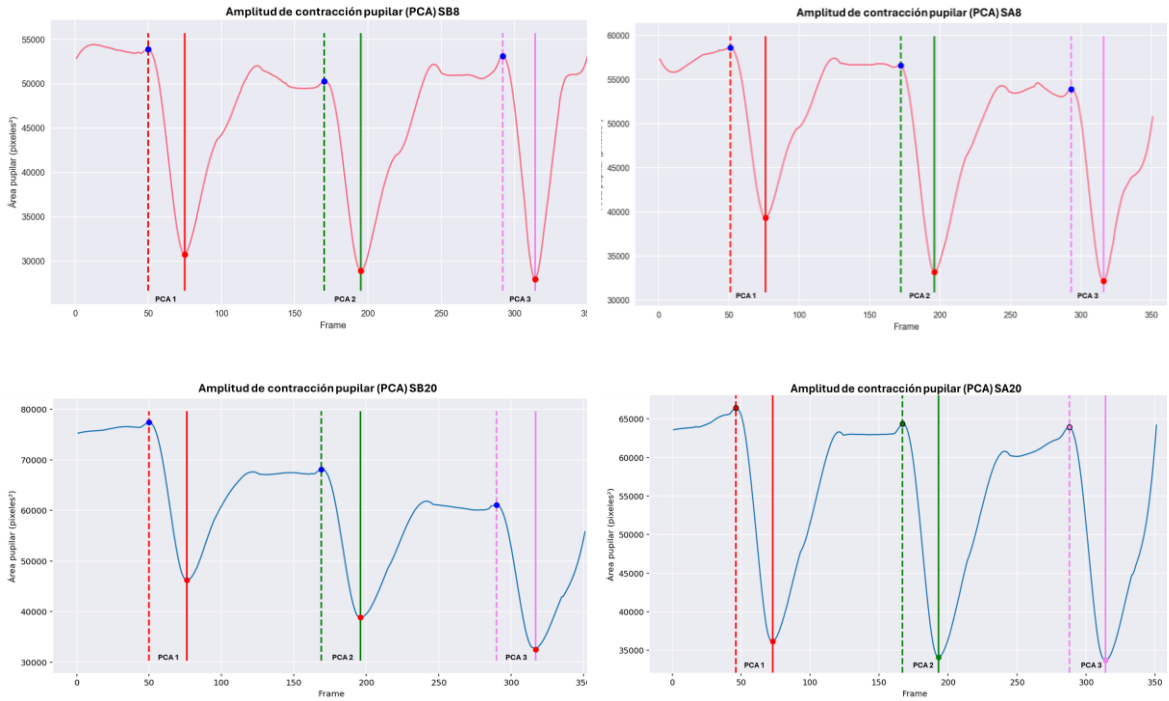


Figura 5. Amplitud de contracción pupilar (PCA) para los estímulos blanco y azul del sujeto 8 (SB8 y SA8) y el sujeto 20 (SB20 y SA20).

A partir de los pares máximo-mínimo se calcula la velocidad de contracción utilizando la siguiente fórmula. Para el cálculo del tiempo de contracción se emplea la Ecuación 2.

$$t = \left(\frac{\Delta frames}{fps}\right) \times 1000 \tag{2}$$

Donde:

$\Delta frames = frame\ maximo - frame\ mínimo$, fps es el número de cuadros por segundo en el video y t es el tiempo expresado en milisegundos.

Por otro lado, para el cálculo de la velocidad se emplea la Ecuación 3.

$$V = \left|\frac{area\ minima - area\ maxima}{t}\right| \tag{3}$$

Donde:

$area\ minima$, el valor del área pupilar en el mínimo (cuando la pupila estaba más contraída), $area\ maxima$, el valor del área pupilar en el máximo (cuando la pupila está en su estado basal), V es la velocidad de cambio del área pupilar ($pixeles^2/ms$)

El resultado de la velocidad tendrá un resultado negativo esto indica que se presenta una contracción, pero para fines prácticos de análisis se toma el valor absoluto. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para PCA y PIPR mostrando un análisis mas detallado.

Velocidad de Recuperación (PIPR): Para encontrar el tiempo de recuperación o PIPR, el algoritmo localiza los picos mínimos (contracciones máximas). De estos, se seleccionan los tres mínimos más prominentes y, a partir de cada uno, se busca el pico máximo posterior, que representa el punto donde la pupila se ha recuperado. La **Figura 6**, muestra las gráficas resultantes de la aplicación del filtro de Savitzky-Galay y el algoritmo, ilustrando la Respuesta Pupilar Post-Iluminación para los estímulos blanco y azul en el Sujeto 8 (SB8, SA8) y el Sujeto 20 (SB20, SA20). Cada PIPR está delimitado por líneas: las líneas continuas (rojo PIPR1, verde PIPR2 y violeta PIPR3) marcan la contracción más profunda, y las líneas punteadas indican la recuperación pupilar hasta alcanzar un Diámetro Pupilar Basal.

En estas gráficas, se observa que el tiempo de recuperación es generalmente más prolongado que el tiempo de contracción. Además, en algunos sujetos, la recuperación pupilar no es completa, lo que podría deberse a fatiga o a la adaptación a los estímulos repetidos. Casos como el de SB8 y SA8, donde se nota una recuperación no constante con pequeñas contracciones intermedias, se manejan en el cálculo de la velocidad considerando solo el punto de recuperación hacia el estado basal.

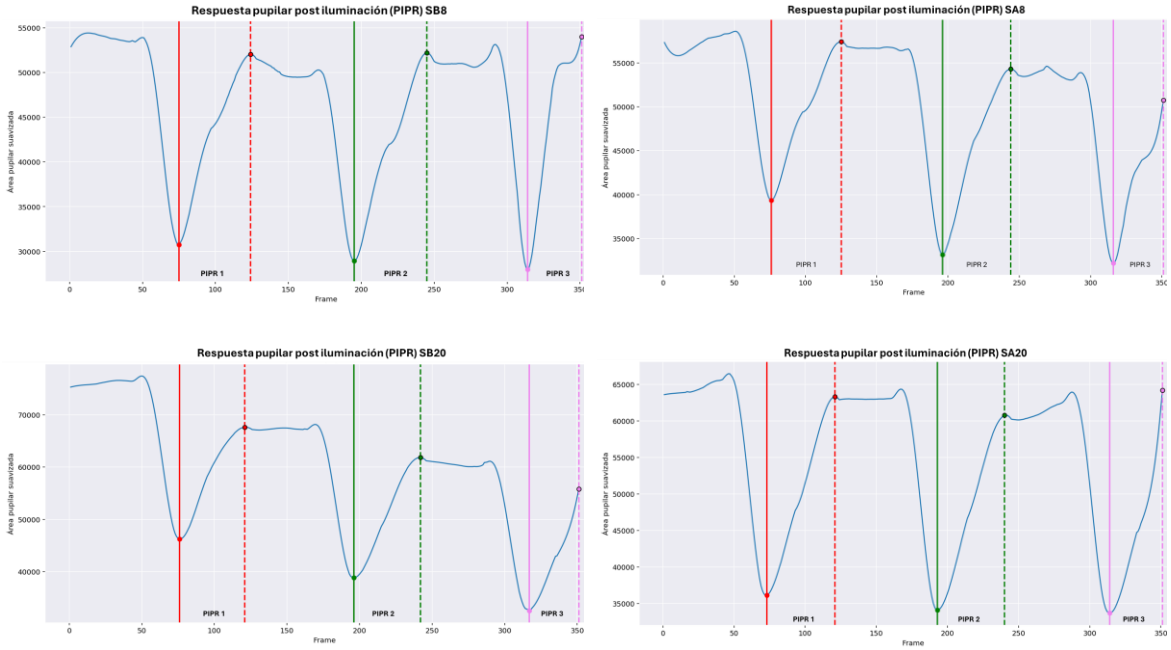


Figura 6. Respuesta pupilar post iluminación (PIPR) para los estímulos blanco y azul del sujeto 8 (SB8, SA8) y el sujeto 20 (SB20 y SA20).

Para cada par mínimo-máximo se calcula PIPR utilizando primero la Ecuación 1 y para el cálculo de la velocidad se emplea la Ecuación 4.

$$V = \frac{area\ final - area\ minima}{t} \qquad (4)$$

Donde: $area\ final$: el valor del área pupilar máxima (cuando la pupila ya se recuperó), $area\ mínima$: el valor del área pupilar mínima (cuando la pupila estaba más contraída), V: Velocidad de cambio del área pupilar ($pixeles^2/ms$).

De acuerdo con los resultados obtenidos se presenta a continuación un análisis descriptivo para analizar el comportamiento de PCA y PIPR para cada estimulo en tres ciclos que duro la experimentación para cada estimulo.

4.2 Análisis Descriptivo para los Estímulos Azul y Blanco

El análisis descriptivo es fundamental para examinar los datos antes de realizar estudios más complejos. Proporciona una visión clara sobre la efectividad de los estímulos utilizados y es crucial para determinar la viabilidad de futuras investigaciones. La **Tabla 1,** presenta los resultados del análisis descriptivo por ciclo, incluyendo la media, mediana y desviación estándar (DE) para cada métrica: Amplitud de Contracción Pupilar (PCA), Respuesta Pupilar Post Iluminación (PIPR) y el Total (suma de PCA y PIPR) para cada uno de los tres ciclos (C1, C2, C3) de estimulación de los colores azul y blanco, aplicado a los 20 sujetos de prueba.

Tabla 1. Análisis descriptivos de los estímulos pupilares azul y blanco por ciclo (C1, C2. C3)

Métrica	Azul C1	Azul C2	Azul C3	Blanco C1	Blanco C2	Blanco C3
PCA - Media	444.17	449.00	445.85	416.67	410.00	420.83
PCA - Mediana	433.33	425.00	433.33	416.67	400.00	400.00
PCA - DE	52.50	87.04	64.64	54.88	25.59	75.68
PIPR - Media	806.10	797.33	576.67	797.33	784.50	545.83
PIPR - Mediana	800.00	783.33	583.33	800.00	791.67	550.00
PIPR - DE	58.72	58.95	105.32	72.12	53.62	100.27
TOTAL - Media	1250.27	1246.33	1018.37	1214.00	1194.50	966.67
TOTAL - Mediana	1233.33	1233.33	1000.00	1216.67	1200.00	950.00
TOTAL - DE	97.08	91.98	122.83	84.24	56.58	90.32

Para una mejor visualización de los datos se presenta un gráfico de barras con las medias de PCA y PIPR en la **Figura 7**, para los tres ciclos de medición (Ciclo 1, Ciclo 2, Ciclo 3) en los estímulos de luz blanca y azul. Donde el Eje x representa los tres ciclos de medición. El eje Y: Muestra las unidades de amplitud (para PCA) o tiempo (para PIPR), dependiendo de la medición. Las barras azules corresponden a las medias de PCA. Las barras rojas corresponden a las medias de PIPR. Las barras de error representan las desviaciones estándar (variabilidad) para cada medición en cada ciclo. Esto indica qué tan dispersos están los valores en relación con la media.

En la **Figura 7,** se observa que la altura de las barras del PCA (azules y celestes) se mantiene relativamente estable a lo largo de los tres ciclos, y son muy similares entre sí para ambos estímulos. Esto sugiere que PCA de la pupila es consistente y no varía significativamente con el tipo de luz (azul vs. blanca) ni con las mediciones repetidas.

Para PIPR, los tiempos de recuperación disminuyen notablemente entre el Ciclo 1 y el Ciclo 3, con una mayor dispersión en los resultados en el último ciclo. El tiempo de recuperación de la pupila (PIPR) disminuye drásticamente del Ciclo 1 al Ciclo 3, tanto para la luz azul como para la blanca.

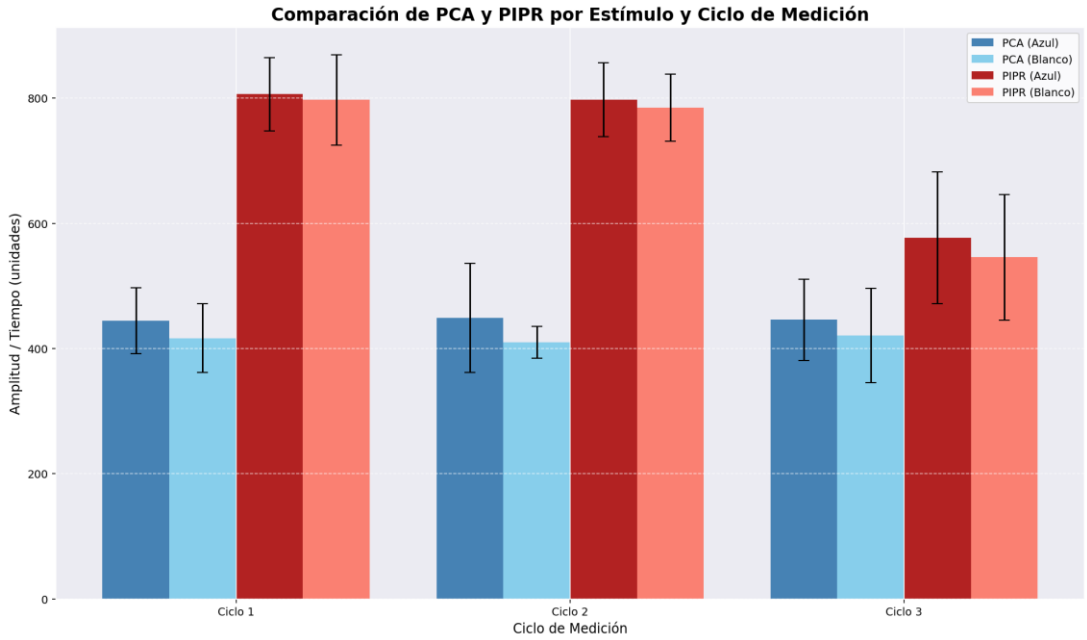


Figura 7. Comparación de PCA Y PIPR para cada ciclo de estimulación de los colores azul y blanco

Aunque la tendencia es la misma para ambos colores, el gráfico muestra que el PIPR al estímulo azul es consistentemente más alto que el PIPR al estímulo blanco en los tres ciclos. Esto sugiere que la luz azul, a pesar de tener una intensidad similar, provoca un tiempo de recuperación de la pupila ligeramente más prolongado. Esta es una diferencia clave entre los dos estímulos.

A continuación, se presenta el análisis más detallado basado en la Tabla 1 y la Figura 7.

Amplitud de Contracción Pupilar (PCA)

- **Promedios:** Los promedios de PCA para el estímulo azul (444.17, 449.00, 445.85) son consistentemente ligeramente más altos que los del estímulo blanco (416.67, 410.00, 420.83) en todos los ciclos. Esto sugiere que la luz azul, en promedio, provoca una contracción pupilar máxima de mayor magnitud. Los promedios se mantienen relativamente estables a lo largo de los ciclos para ambos estímulos.
- **Media vs. Mediana:** La cercanía entre la media y la mediana en todas las condiciones de PCA indica que la distribución de las respuestas de contracción máxima es generalmente **simétrica** y no está fuertemente sesgada por valores extremos.
- **Desviación Estándar (DE):** La DE más baja se observa en PCA para el estímulo blanco en el Ciclo 2 (25.59). Este valor notablemente bajo, sugiere que la respuesta de contracción pupilar máxima para el estímulo blanco fue consistente entre los participantes en esa exposición. Las DEs para PCA en otras condiciones son moderadas, con un ligero aumento en la variabilidad en el Ciclo 2 para el estímulo azul (87.04) y en el Ciclo 3 para el estímulo blanco (75.68). Esto indica que, aunque la media pueda no cambiar, la consistencia individual de la respuesta puede variar, como se ilustra en las Figuras 3 y 4.

Respuesta Pupilar Post-Iluminación (PIPR)

- **Promedios:** La característica más prominente es la **disminución constante de los promedios de PIPR** a lo largo de los ciclos para ambos estímulos. Por ejemplo, para el estímulo azul, el promedio cae de 806.10 (Ciclo 1) a 576.67 (Ciclo 3). Se observa una

tendencia similar para el estímulo blanco (de 797.33 a 545.83). Esta tendencia es una fuerte evidencia de **adaptación de la respuesta pupilar** a lo largo de las exposiciones. Los promedios entre estímulos (azul vs. blanco) son bastante similares en cada ciclo.

- **Media vs. Mediana:** La proximidad entre la media y la mediana confirma que las distribuciones son generalmente simétricas.
- **Desviación Estándar (DE):** Se registra un **aumento drástico en la DE** para ambos estímulos en el Ciclo 3 (105.32 para azul, 100.27 para blanco). Esto es crucial: a medida que el sistema pupilar se adapta a la penumbra y a los estímulos, la respuesta disminuye, y la magnitud de esta adaptación puede variar considerablemente entre los individuos. Las DEs en los Ciclos 1 y 2 son considerablemente bajas, lo que indica una mayor consistencia en las fases iniciales de la respuesta sostenida.

Respuesta Pupilar Total (TOTAL)

- **Promedios:** Similar al PCA, los promedios de TOTAL para el **estímulo azul** (1250.27, 1246.33, 1018.37) son generalmente **más altos** que los del **estímulo blanco** (1214.00, 1194.50, 966.67), sugiriendo una respuesta total ligeramente mayor para la luz azul. Al igual que en el PIPR, los promedios de TOTAL disminuyen notablemente a lo largo de los ciclos para ambos estímulos, corroborando la adaptación.
- **Media vs. Mediana:** La cercanía entre media y mediana sugiere distribuciones simétricas.
- **Desviación Estándar (DE):** Se observa nuevamente una **DE muy alta en el Ciclo 3** para el estímulo azul (122.83) y una DE alta para el estímulo blanco (90.32). Esto corrobora que los participantes pueden experimentar fatiga, lo que se implica una variabilidad individual en las etapas finales de la captura de los PLR. Estos datos son consistentes con el cuestionario aplicado donde una gran cantidad de los encuestados presentan fatiga ocular.

5 Conclusiones y Trabajo Futuro

Este estudio representa un esfuerzo significativo para construir la infraestructura necesaria sin depender de mecanismos costosos de oftalmología y poner a disposición datos sobre las áreas pupilares de este tipo de estímulos luminosos, para invitar al desarrollo de investigación sobre este tema importante.

Este trabajo resalta la importancia del uso de estímulos con diferentes longitudes de onda, como la luz azul y blanca. Estos estímulos pueden ser clave para identificar patrones en la respuesta pupilar que, a su vez, podrían servir como indicadores de la salud ocular.

En este trabajo, se presentaron los resultados preliminares de la variación de las áreas pupilares ante estímulos de luz azul y luz blanca. Las series de tiempo obtenidas permitieron distinguir en la parte final de cada serie ocular los indicios de cansancio en los resultados del cálculo de PIPR.

El análisis de los diferentes patrones PLR abre la puerta a futuras investigaciones que utilicen inteligencia artificial para encontrar biomarcadores para condiciones como la depresión o la fatiga visual en la comunidad estudiantil de la UAEMEX Valle de México, es por ello por lo que adquiere una relevancia significativa este tema de investigación.

El protocolo implementado aún puede tener sesgos para obtener y procesar la información, por lo que es importante realizar un análisis detallado para una implementación futura con técnicas de procesamiento avanzadas de Inteligencia Artificial.

Se reconocieron diferentes artefactos que pueden influir en el análisis pupilar, por lo que es importante seguirlos estudiando para obtener resultados con mejor exactitud.

La finalidad de tomar un grupo reducido de sujetos de prueba, corriendo el riesgo de poder realizar solo un análisis descriptivo, es para, en primera instancia, conocer si la infraestructura implementada era capaz de obtener información sobre los PLR, y así fue satisfactoriamente, ya que las series pupilares obtenidas son semejantes a las encontradas en el trabajo de Belen-Luna et al. (2024).

En trabajos futuros Incluir el factor PCA y PIPR para conocer los efectos que tiene los estímulos RGB en hombres y mujeres por separado y realizar un análisis que permita conocer sus connotaciones y efectos. Además, incluir una muestra mucho más grande para este estudio.

Para obtener resultados más precisos y confiables en futuros trabajos, se plantea implementar un tiempo de descanso entre cada prueba de los diferentes estímulos lumínicos, además de ejecutar la prueba asegurándose de que los sujetos tuvieron un periodo de sueño reparador, y que los estudios se realicen por la mañana.

Al observar las diferencias que existen en las series oculares obtenidas, es importante un rango de edad característico, con una muestra más diversa y representativa para encontrar patrones en la aplicación de estudios posteriores.

Bibliografía

Aderman, M. J., Meister, M. R., Roach, M. H., Dengler, B. A., Ross, J. D., Malvasi, S. R., & Cameron, K. L. (2024). Normative values for pupillary light reflex metrics among healthy service academy cadets. Military Medicine, 189(7–8), 1593–1602. https://doi.org/10.1093/milmed/usad271

Belen-Luna, J. C., González-Morán, C. O., Lima-Goméz, V., & Suaste-Gómez, E. (2024). Pupillary Reflex Variability and its Correlation with RGB Color Sensitivity. Latin American Conference on Biomedical Engineering. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89514-2_24.

Blandino Ortiz, A., & Higuera Lucas, J. (2022). Utilidad de la pupilometría cuantitativa en la unidad de cuidados intensivos [10.1016/j.medin.2021.12.003]. *Medicina Intensiva*, *46*(5), 273–276. https://doi.org/10.1016/j.medin.2021.12.003

Bremner, F. D. (2012). Pupillometric evaluation of the dynamics of the pupillary response to a brief light stimulus in healthy subjects. *Investigative Ophthalmology & Visual Science, 53*(11), 7343–7347. https://doi.org/10.1167/iovs.12-10881

Chougule, P. S., Najjar, R. P., Finkelstein, M. T., Kandiah, N., & Milea, D. (2019). Light-induced pupillary responses in Alzheimer's disease. Frontiers in neurology, 10, 360. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80001-5. https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00360

Christofi, G. (2022). A clinical approach to coma: neurological assessment of the comatose patient. Anaesthesia & Intensive Care Medicine, 23(12), 764–775. https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2022.10.002

Conti, F., Battaglini, P. P., & Mora, E. (2010). *Oftalmología en la práctica de la medicina general* (1.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana de España S.L

Espinosa, J., Roig, A. B., Pérez, J., & Mas, D. (2015). A high-resolution binocular videooculography system: Assessment of pupillary light reflex and detection of an early incomplete blink and an

upward eye movement. *Biomedical Engineering Online, 14*(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/s12938-015-0016-6

Fan, X., & Yao, G. (2010). Modeling transient pupillary light reflex induced by a short light flash. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 58*(1), 36–42. https://doi.org/10.1109/TBME.2010.2080678

Ren, P., Barreto, A., Gao, Y., & Adjouadi, M. (2012). Affective assessment by digital processing of the pupil diameter. *IEEE Transactions on Affective Computing, 4*(1), 2–14. https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2012.25

Fan, X., Hearne, L., Lei, B., Miles, J. H., Takahashi, N., & Yao, G. (2009). Weak gender effects on transient pupillary light reflex. *Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical, 147*(1-2), 9-13. https://doi.org/10.1016/j.autneu.2008.12.010

Graue Wiechers, E. (2019). Exploración de los reflejos pupilares. En E. Graue Wiechers (Ed.), Oftalmología en la práctica de la medicina general (5.ª ed., pp. [rango de páginas]). McGraw-Hill Interamericana de España.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023, 6 de julio). *Encuesta Nacional sobre Salud y Envejecimiento en México (ENASEM) y encuesta de evaluación cognitiva 2021. Comunicado de prensa núm. 394/23* [Comunicado de prensa]. https://www.inegi.org.mx/programas/enasem/2021

Kuze, M., Negishi, K., Koyasu, T., Kondo, M., Tsubota, K., & Ayaki, M. (2021). Cataract type and pupillary response to blue and white light stimuli. Scientific Reports, 11(1), 1828. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79751-8

Martínez-Ricarte, F., Castro, A., Poca, M. A., Sahuquillo, J., Expósito, L., Arribas, M., & Aparicio, J. (2013). Pupilometría por infrarrojos. Descripción y fundamentos de la técnica y su aplicación en la monitorización no invasiva del paciente neurocrítico [10.1016/j.nrl.2010.07.028]. Neurología, 28(1), 41–51. https://doi.org/10.1016/j.nrl.2010.07.028

Maruani, J., Vissouze, L., Hebert, M., Rach, H., Zehani, F., Lejoyeux, M., Bourgin, P., & Geoffroy, P. A. (2025). Pupillary response to blue light as a biomarker of seasonal pattern in Major Depressive Episode: A clinical study using pupillometry. Psychiatry Research, 344, 116333. https://doi.org/10.1016/j.psychres.2024.116333

Pinheiro, H. M., & da Costa, R. M. (2021). Pupillary light reflex as a diagnostic aid from computational viewpoint: A systematic literature review. *Journal of Biomedical Informatics, 117*, 103757. https://doi.org/10.1016/j.jbi.2021.103757

Quiroz-Gonzalez, E. A., Quiroz-Reyes, M. A., Gonzalez-Gonzalez, C., Loaeza-Castrejon, R., Haro-Morlett, L., Bautista-Barba, A., Fulda-Graue, E., & Graue-Wiechers, F. (2021). Unilateral Retinoblastoma Presentation in a Latin-American Teenager: A Case Report and Literature Review. International Journal of Ophthalmology & Visual Science, 6(4), 267–272. https://doi: 10.11648/j.ijovs.20210604.23

Schafer, R. W. (2011). What is a savitzky-golay filter?[lecture notes]. IEEE Signal processing magazine, 28(4), 111–117. https://10.1109/MSP.2011.941097

Secretaría de Salud. (2020). *Día Mundial de la Visión 2020*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/salud/es/articulos/dia-mundial-de-la-vision-2020?idiom=es

Tan, T. E., Finkelstein, M. T., Tan, G. S. W., Tan, A. C. S., Chan, C. M., Mathur, R., Wong, E. Y. M., Cheung, C. M. G., Wong, T. Y., & Milea, D. (2022). Retinal neural dysfunction in diabetes revealed

with handheld chromatic pupillometry. Clinical & Experimental Ophthalmology, 50(7), 745–756. https://doi.org/10.1111/ceo.14116

Tripolone, M. C., Issolio, L. A., Aguero, C. A., Lavaque, A., & Barrionuevo, P. A. (2023). Pupilometría cromática en pacientes con sospecha de glaucoma primario de ángulo abierto. https://doi.org/10.70313/2718.7446.v16.n04.258

Vimalajeewa, D., McDonald, E., Bruce, S. A., & Vidakovic, B. (2022). Wavelet-based approach for diagnosing attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). Scientific Reports, 12(1), 21928. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26077-2

Zarifkar, P., Othman, M. H., Hansen, K. I. T., Amiri, M., Stückler, S. G., Fabritius, M. L., Sigurdsson, S. T., Hassager, C., Birkeland, P. F., & Hauerberg, J. (2024). The Pupillary Light-Off Reflex in Acute Disorders of Consciousness. *Neurocritical Care, 1–12*. https://doi.org/10.1007/s12028-024-02133-9

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

BIOMEDICA
Recibido 23 Nov. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*
Aceptado 24 Nov. 2025

HIDROGELES: PROPIEDADES, CLASIFICIACIÓN Y AVANCES RECIENTES

HYDROGELS: PROPERTIES, CLASSIFICATION AND RECENT AVANCES

Abraham Gabriel Alvarado Mendoza[1]
gabriel.alvarado@academicos.udg.mx
Samuel Abiud Garnica Duran[2]
samuel.garnica5945@alumnos.udg.mx
Ana María Alfaro Ziranda[3]
ana.alfaro2742@alumnos.udg.mx
Rosaura Hernández Montelongo[4]
rosaura.hernandez@academicos.udg.mx

[1] Departamento de Química, CUCEI, Universidad de Guadalajara
[2] Doctorado en Ciencias en Materiales, CUCEI, Universidad de Guadalajara
[3] Licenciatura en Química, CUCEI, Universidad de Guadalajara
[4] Departamento de Bioingeniería Traslacional, CUCEI, Universidad de Guadalajara.

Resumen

Esta mini revisión presenta una visión global de los hidrogeles, materiales poliméricos que han atraído la atención en gran medida por las múltiples aplicaciones en las cuales intervienen sobre todo en el área biomédica. Se abordan las definiciones básicas, clasificación, propiedades y mecanismos de respuesta a estímulos externos tales como cambios en el pH del medio, cambios de temperatura, presión y sensibilidad a las enzimas debido a su relevancia en la administración de fármacos, medicina regenerativa y las estrategias terapéuticas emergentes. Se presentan los avances recientes en las aplicaciones biomédicas y los retos en su aplicación clínica. La multifuncionalidad y la adaptabilidad de estos materiales resalta su rol en el desarrollo de las nuevas generaciones de tecnologías para la medicina personalizada y de precisión.

Palabras Clave: Hidrogeles, Nanogeles, Liberación controlada, Aplicaciones biomédicas.

Abstract

This mini-review presents an overview of hydrogels, polymeric materials that have attracted significant attention due to their multiple applications, especially in the biomedical field. It addresses basic definitions, classification, properties, and mechanisms of response to external stimuli such as changes in environmental pH, temperature variations, pressure, and enzyme sensitivity, due to their relevance in drug delivery, regenerative medicine, and emerging therapeutic strategies. Recent advances in biomedical applications and the challenges in their clinical implementation are also presented. The multifunctionality and adaptability of these materials highlight their role in the development of new generations of technologies for personalized and precision medicine.

Keywords: Hydrogels, Nanogels, Controlled Release, Biomedical Applications.

Introducción

Los hidrogeles son una red tridimensional compuesta por cadenas de polímeros naturales o sintéticos entrecruzadas, por lo cual, son capaces de adsorber y retener agua o fluidos biológicos. Su capacidad para retener agua procede de los grupos funcionales presentes en sus cadenas tales como alcoholes (-OH), ácidos carboxílicos (-COOH), aminas ($-NH_2$), sulfonico ($-SO_3H$) entre otros que tienen afinidad hacia las moléculas de agua (Jiang et al., 2023; Nugroho et al., 2022).

Los hidrogeles poseen propiedades que los hace especialmente adecuados para su uso en el cuerpo humano, son suaves al tacto, elásticos, tienen alta porosidad, capacidad de absorción, presentan buena resistencia y fuerza mecánica y debido a la cantidad de agua que pueden adsorber tienen una alta compatibilidad con tejidos vivos. Además, sus propiedades pueden ajustarse en función del tipo de polímero utilizado, el contenido de monómero empleado en su síntesis, el tipo y grado de entrecruzamiento y el medio de síntesis. Debido a estas características, los hidrogeles se usan ampliamente como base para la administración de fármacos, favorecer el crecimiento de tejidos o servir de elementos en sistemas de diagnóstico.

Clasificación

Los hidrogeles pueden clasificarse de diversas formas; por ejemplo, según la fuente, su tamaño, composición, la carga presente es sus cadenas, el tipo de entrecruzamiento y según la respuesta que presentan a estímulos externos, entre otros (Figura 1).

Con base en la fuente los hidrogeles pueden ser *naturales y sintéticos*, los primeros son aquellos formados por polímeros naturales, como alginato (proveniente de algas marinas), gelatina, ácido hialurónico o quitosano, todos ellos biodegradables y biocompatibles. Por otro lado, los hidrogeles sintéticos se sintetizan en laboratorio a partir de monómeros tales como acrilamida (AM), N-isopropilacrilamida (NIPAM), ácido acrílico (AA), ácido metacrilico (AMA), Ácido 2-Acrilamido-2-metilpropano sulfónico (AMPS) entre otros, en la síntesis de hidrogeles sintéticos usualmente se tiene un mayor control sobre la estructura, la resistencia y la reproducibilidad (Fan et al., 2022).

Según su composición los hidrogeles pueden ser *homopolímeros*, es decir, sus cadenas están compuestas por un solo tipo de monómero, mientras que aquellos que contienen dos unidades de monómero diferentes presentes en la misma cadena se les llama *copolímeros*. Estos últimos tienen la ventaja de que combinan las propiedades de al menos dos monómeros, por ejemplo, hidrogeles compuestos del copolímero formado por NIPAM y AA poseen respuesta al cambio de temperatura gracias a la NIPAM y respuesta al pH del medio debido a la presencia del AA (Figura 2). Una de las debilidades de los hidrogeles es que a mayor capacidad de hinchamiento menor resistencia mecánica presentan, por esta razón se han desarrollado *redes poliméricas interpenetradas* (IPN, de sus siglas en inglés Interpenetrating Polymer Network), en estos hidrogeles dos redes poliméricas distintas se entrelazan, mejorando propiedades como la resistencia mecánica y la adsorción de agua,

además, algunos de ellos presentan hinchamientos súbitos a una temperatura específica, por ejemplo, la IPN formada por AM y AA (Owens et al, 2007).

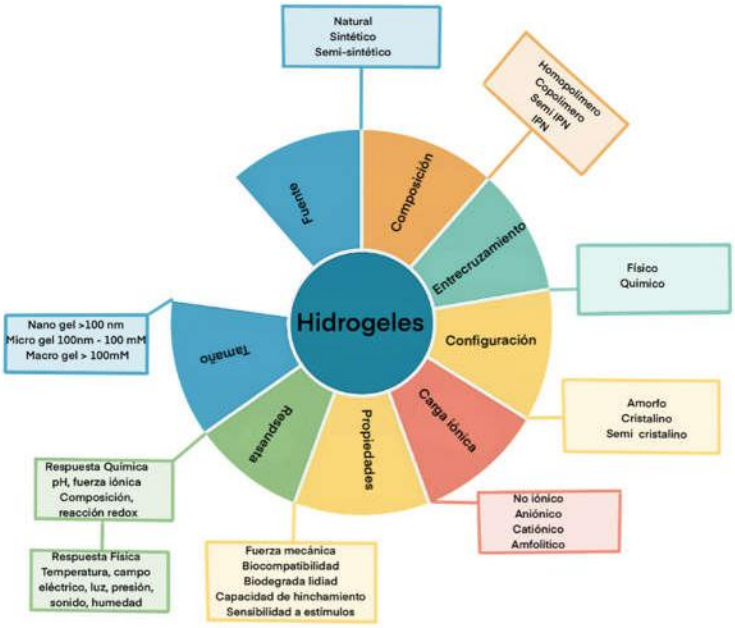


Figura 1. Clasificación de los hidrogeles.

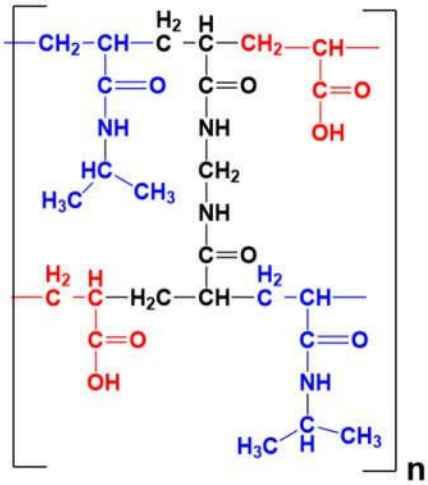


Figura 2. Hidrogel compuesto por NIPAM y AA entrecruzado con NN metilenbisacrilamida

Con el objetivo de sintetizar hidrogeles biodegradables se han desarrollado *semi redes poliméricas interpenetradas* (semi-IPN), en este caso largas cadenas de un polímero quedan insertadas dentro de una red de otro polímero. Usualmente las semi-IPN emplean polímeros naturales como la quitosana o los derivados de la celulosa los cuales quedan inmersos en la red de un *homopolímero* o copolímero sintético (Figura 3) por ejemplo el copolímero compuesto por AM y AA.

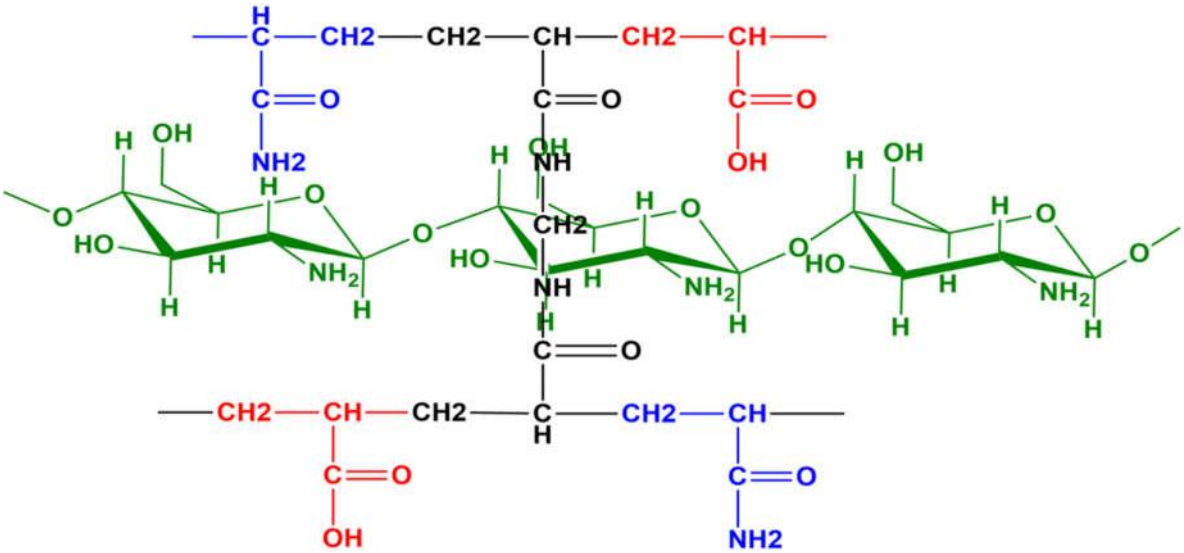


Figura 3. Estructura de una Semi-IPN, compuesta de quitosana y la red formada por el poli(acrilamida-co-ácido acrílico).

El entrecruzamiento de las cadenas para formar a un hidrogel puede ser físico o químico. El entrecruzamiento físico forma enlaces débiles, por ejemplo, enlaces por puentes de hidrógeno o fuerzas iónicas que generan hidrogeles blandos y, en ocasiones este entrecruzamiento es reversible. Por otro lado, los hidrogeles con entrecruzamiento químico, poseen fuertes enlaces covalentes irreversibles, a mayor concentración del entrecruzante los hidrogeles serán más duros y tendrán una menor capacidad de adsorción (Figura 4).

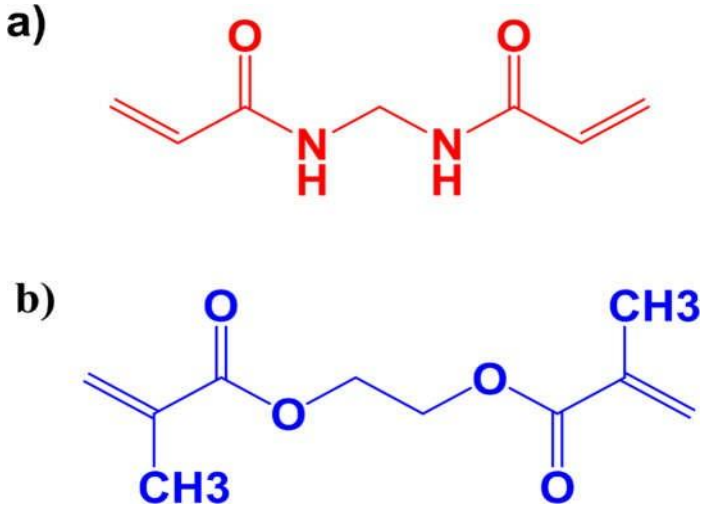


Figura 4. Agentes entrecruzantes, empleados en entrecruzamiento químico de hidrogeles a) N´N´-metilenbisacrilamida (NMBA) y b) etilenglicoldimetacrilato (EGDMA).

La estructura interna o configuración de los hidrogeles puede influir mucho en sus propiedades y por ende en sus aplicaciones. A nivel molecular, algunos hidrogeles tienen una disposición aleatoria o desordenada de las cadenas poliméricas. Se denominan *hidrogeles amorfos* y tienden a ser más flexibles y capaces de absorber agua rápidamente, aunque pueden carecer de resistencia estructural. En cambio, otros hidrogeles son *semicristalinos*, es decir, contienen regiones en las que las cadenas poliméricas están más compactas y ordenadas. Estas regiones ordenadas pueden mejorar la resistencia mecánica y la estabilidad térmica del material, a la vez que le permiten mantenerse blando e hidratado (Ho, 2022; Zhang, 2028).

Otro factor que influye en el funcionamiento de los hidrogeles y por ende en su clasificación es la carga iónica presente a lo largo de las cadenas, especialmente en aplicaciones biomédicas. Esta propiedad puede afectar significativamente a la forma en la que el hidrogel interactúa con su entorno, incluidas las células, proteínas, y otras moléculas biológicas. Algunos hidrogeles son neutros, es decir, no presentan una carga eléctrica. Suelen utilizarse cuando se necesita un material estable y no reactivo, como en los lentes de contacto o como base para la ingeniería de tejidos. Al no interactuar fuertemente con las moléculas biológicas cargadas, tienden a ser más inertes y menos propensos a causar reacciones no deseadas (Hou, 2022).

Otros hidrogeles son aniónicos, es decir, tienen cargas negativas. La cual suele provenir de los grupos ácidos de las cadenas poliméricas. Estos materiales son especialmente buenos para atraer sustancias con carga positiva, como ciertos fármacos, proteínas o iones metálicos. Esto los hace útiles en los sistemas de captación y liberación de fármacos, donde el hidrogel puede ayudar a mantener el fármaco en su lugar y liberarlo lentamente con el tiempo. Por el contrario, otros hidrogeles son catiónicos, es decir, tienen cargas positivas a lo largo de sus cadenas. Estas suelen proceder de los grupos amina del polímero. Los hidrogeles catiónicos son idóneos para interactuar con membranas celulares o ADN cargados negativamente, y suelen utilizarse en aplicaciones como la cicatrización de heridas o los sistemas antimicrobianos, ya que la carga positiva puede ayudar a unirse a las membranas bacterianas y romperlas (Figura 5). Finalmente, existen otro tipo de hidrogeles más complejos conocidos como *hidrogeles zwitteriónicos*, que llevan cargas positivas y negativas al mismo tiempo, pero de forma equilibrada. Esta estructura de carga única los hace extremadamente resistentes a la acumulación indeseada de proteínas, una de las principales causas de inflamación y reacciones inmunitarias. Como resultado, los hidrogeles zwitteriónicos están ganando atención para su uso en implantes, biosensores, y otros dispositivos biomédicos de larga duración, donde evitar el rechazo inmunológico es fundamental (Gori, 2022).

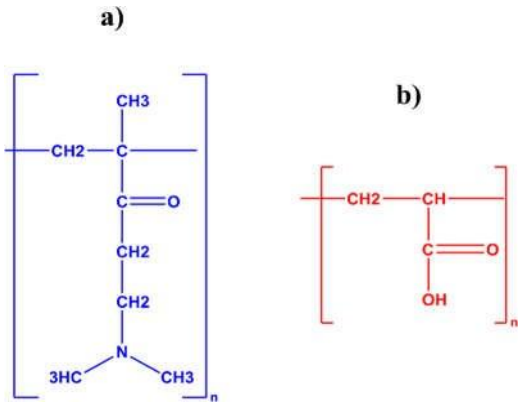


Figura 5. Ejemplos de polímeros empleados en la síntesis de hidrogeles catiónicos; a) poli (2-dimetilamino) etil metacrilato e hidrogeles aniónicos; b) poli (ácido acrílico).

Algunos hidrogeles están diseñados para responder a cambios específicos en su entorno. Son los llamados *hidrogeles inteligentes o hidrogeles sensibles a estímulos*. Lo que los hace "*inteligentes*" es su capacidad para detectar un cambio especifico en su ambiente lo que genera una respuesta. Estos estímulos de respuesta se pueden deber a cambios de la temperatura del medio, cambio en

el pH, la presencia de enzimas o las condiciones redox e incluso como respuesta a la presión. Un ejemplo de hidrogeles inteligentes son aquellos sintetizados a partir de poli(N-isopropilacrilamida) (PNIPAM). Este polímero es suave y blando y sus cadenas son altamente hidrofilicas a temperturas por debajo de los 32 °C. Sin embargo, cuando la temperatura aumenta más allá de esta temperatura, la estructura cambia, las cadenas poliméricas se sienten menos atraídas por el agua y el material colapsa, formando un gel más denso. Esta transición sol-gel hace que los hidrogeles basados en PNIPAM sean muy útiles en aplicaciones biomédicas. Por ejemplo, pueden prepararse de tal manera que puedan ingresar en un sistema de inyección, permaneciendo blandos y fluidos, a temperatura bajas, sin embargo, colapsan a temperatura altas. (Xie et al., 2024). Por otro lado, los hidrogeles químicamente sensibles tienen la capacidad de reaccionar a cambios en el entorno químico. La capacidad mayormente estudiada es el cambio del pH, los cuales se hinchan o colapsan de acuerdo con la acidez o alcalinidad de su entorno. Esto resulta muy útil para tratamientos de tejidos, zonas inflamadas y en la eliminación de tumores.

Del mismo modo, los hidrogeles sensibles a las enzimas se desarrollan para reaccionar cuando hay cierto tipo de enzimas presentes. Puesto que estas se producen en exceso en enfermedades como el cáncer, la artritis o heridas infectadas, estos hidrogeles pueden programarse para liberar fármacos o cambiar su estructura en presencia de ciertas enzimas. Por otro lado, otro desencadenante químico es el estado redox, que se refiere al equilibrio entre oxidantes y antioxidantes en tejidos. Muchas enfermedades implican estrés oxidativo, es decir, un exceso de especies reactivas (ROS). Estos hidrogeles están diseñados para cambiar su estructura cuando se exponen a ROS, lo que los convierten en excelentes candidatos para el tratamiento específico en entornos oxidativos.

Aplicaciones biomédicas de los hidrogeles.

A pesar de ser muy prometedoras, las tecnologías en los hidrogeles siguen planteando varios retos en cuanto a su aplicación clínica y su desarrollo industrial. Entre los principales obstáculos están los problemas relacionados con la estabilidad a largo plazo bajo condiciones fisiológicas, la esterilización sin comprometer la funcionalidad, la reproducibilidad entre lotes, la producción en masa rentable, y el cumplimiento de las normas reglamentarias. Deben ser biocompatibles, no tóxicos y biodegradables. La integración de hidrogeles en dispositivos implantables como biosensores, apósitos inteligentes para la curación de heridas, ingeniería de tejidos y liberación de fármacos son las principales aplicaciones biomédicas de los hidrogeles (Figura 6) (Omidian, 2024; Giordano et al., 2025; Dell et al., 2022; Mohan et al., 2024; Rafael et al., 2021).

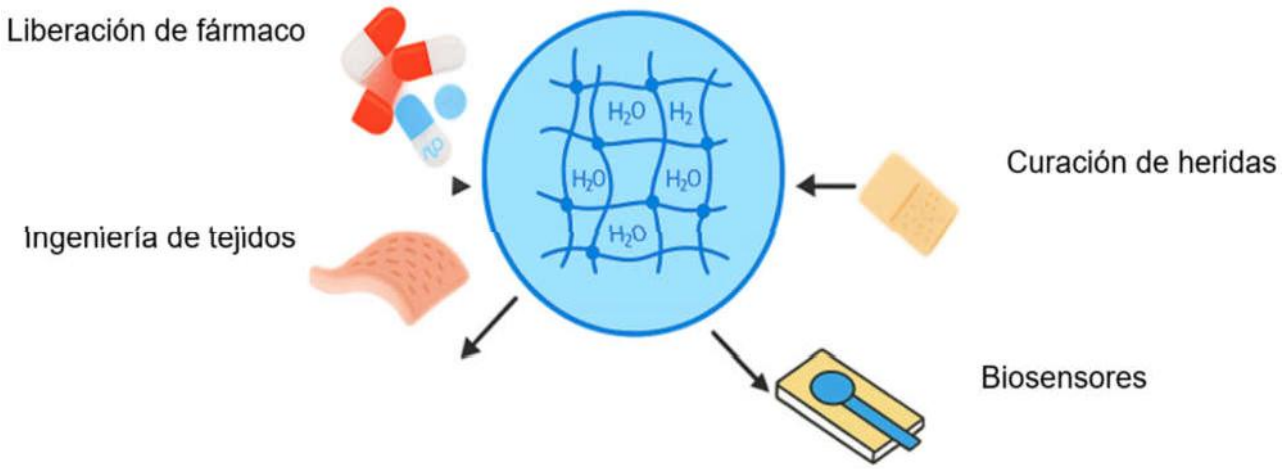


Figura 6. Aplicaciones biomédicas de los hidrogeles.

Hidrogeles para liberación de fármaco.

En las últimas dos décadas, los sistemas de administración para fármacos basados en hidrogeles han ganado un protagonismo importante como una de las plataformas más versátiles y personalizables de la ingeniería biomédica. Estos materiales han superado con mucho la idea simple de portadores pasivos y se han convertido en matrices multifuncionales y sensibles que pueden adaptarse específicamente para interactuar con entornos biológicos complejos. Su capacidad para ser diseñados a nivel molecular ha abierto nuevas oportunidades para la liberación de un amplio espectro de agentes terapéuticos, incluyendo fármacos de moléculas pequeñas, péptidos, proteínas, ácidos nucleicos e incluso células vivas con cinética de liberación controlada y precisión. Una de las ventajas significativas de los hidrogeles en la liberación de fármacos (Figura 7) es su alto grado de modularidad. Mediante el ajuste de la composición polimérica, la concentración o tipo de entrecruzamiento y la incorporación de ciertos grupos funcionales; los investigadores pueden diseñar hidrogeles que permitan la liberación controlada del fármaco en lugares específicos, lo que resulta especialmente valioso en el tratamiento de patologías localizadas como el cáncer, las infecciones o las inflamaciones crónicas.

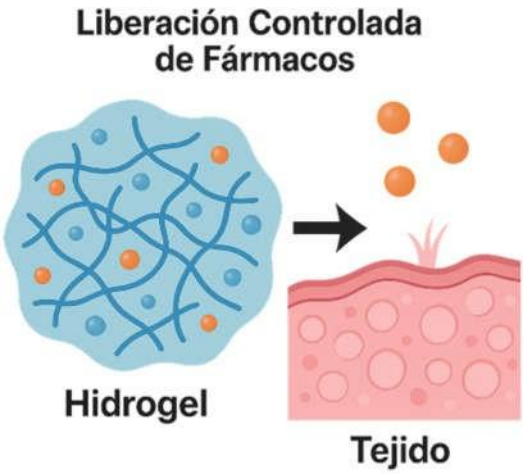


Figura 7. Representación de un sistema de liberación controlad mediante un hidrogel.

En 2025, Sipos et al. desarrollaron hidrogeles de goma de gellan y celulosa, diseñados para la administración intranasal de micelas poliméricas cargadas de riperidona (antipsicótico atípico utilizado en el tratamiento de la esquizofrenia y otros trastornos psiquiátricos,). Su sistema de doble nivel ofrecía una mucoadhesión mejorada, una respuesta a los iones presentes y una transición de los perfiles de liberación en ráfaga a los de la liberación sostenida, lo que enfatizó su potencial uso en la administración en el sistema nervioso central (SNC) por vía olfativa (Sipos et al., 2025). En el campo de la terapia periodontal, Varughese et al (2025) desarrollaron nanogeles cargados con azitromicina (antibiótico de amplio espectro) en una matriz de goma de xantana. Esta formulación permitió una administración correcta en las bolsas periodontales, combinando la biodisponibilidad de las nanoemulsiones con las propiedades mucoadhesivas y antimicrobianas de los geles de xantano, logrando así una eficacia en la encapsulación de hasta el 100% (Varughese et al., 2025).

Encinas-Basurto et al (2025) propusieron hidrogeles compuestos de carboximetil de quitosano-genipina para la administración de suramina (medicamento antihelmíntico) en tejidos epiteliales. Su estudio demostró que la variación de las densidades de entrecruzamiento de la genipina modula tanto el comportamiento mecánico como difusional del hidrogel. Cuando se tiene 1% en la formulación de genipina se alcanzaron las mayores tasas de hinchamiento y liberación, favoreciendo el control de difusión para el tratamiento de úlceras epiteliales o inflamación de la mucosa (Encinas-Basurto et al. (2025)). Rhinow et al (2025) utilizaron hidrogeles basados en poloxámeros para la administración de ibuprofeno, ketoprofeno y diclofenaco, analizando el comportamiento micelar mediante dispersión de neutrones de ángulo pequeño. Sus hallazgos pusieron en evidencia cómo la incorporación del fármaco influyó en la estructura micelar, la termosensibilidad del sistema facilitó la estabilización del fármaco y el módulo de liberación bajo temperatura fisiológicas (Rhinow et al., 2025).

Hidrogeles termosensibles

Los hidrogeles termo sensibles han tenido un gran impacto en el campo de la biomedicina debido a su capacidad para experimentar transiciones reversibles de solución a gel o sol-gel como respuesta a los cambios de temperatura, especialmente cercanas a la temperatura fisiológica. La transición sol-gel se refiere al cambio de fase dependiente de la temperatura en el que el material pasa de un estado líquido (solución) a un estado semi sólido (gel) el cual conserva su estructura tridimensional y tiene la capacidad de encapsular agentes terapéuticos (Figura 8).

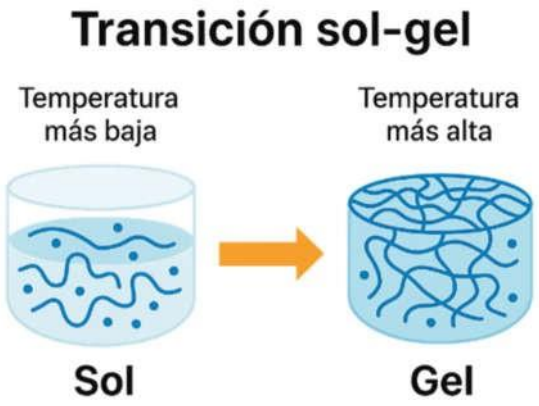


Figura 8. Representación de la transición sol-gel inducida por temperatura.

Este comportamiento reversible permite una administración mínimamente invasiva, ya que el hidrogel puede aplicarse o inyectarse en su forma de solución y posteriormente solidificarse in situ a temperatura corporal. Estos materiales tienen grandes ventajas para el control y liberación de fármacos, ingeniería de tejidos y los sistemas terapéuticos inyectables. Su comportamiento dinámico se atribuye en gran medida a la presencia de polímeros termo sensibles, por ejemplo, la PNIPAM que presentan una temperatura crítica inferior de disolución (LCST, del inglés Lower Critical Solution Temperature) alrededor de los 32-35 °C. Por debajo de este límite, el hidrogel permanece en estado hinchado e hidratado; por encima de este límite, dominan las interacciones hidrófobas, lo que provoca el colapso del polímero y la liberación del fármaco.

Plugariu et al (2025), revisaron diversas formulaciones termo responsivas para la administración transdérmica de meloxicam (antinflamatorio no esteroidal). El estudio resaltó los hidrogeles inyectables a base de Pluronic F127, un copolímero tribloque no iónico compuesto de poli (óxido de etileno)- poli (óxido de propileno)- poli (óxido de etileno) (PEO-PPO-PEO), y derivados de poliuretano que proporcionaron una administración sostenida con mayor permeabilidad cutánea y biocompatibilidad. Estos sistemas inteligentes respondieron a aumentos locales de temperatura, favoreciendo la acción terapéutica en zonas de tejido inflamado mientras se minimiza la exposición del sistema (Plugariu et al. 2025).

Del mismo modo, Esparza et al, desarrollaron hidrogeles termo sensibles compuestos de quitosano/ β-glicerofosfato, los cuales se transforman desde una fase líquida hasta una estructura de gel al

aproximarse a la temperatura del cuerpo humano. Este tipo de sistemas demostraron excelente biocompatibilidad y facilidad para ser inyectados, lo que los hace adecuados para la terapia localizada del cáncer y la medicina regenerativa. Sus parámetros de formulación permitieron ajustar el tiempo de gelificación y la cinética de degradación, esenciales para la adaptabilidad clínica (Esparza-Villalpando et al., 2025). En otro estudio, Viezuina et al. presentaron hidrogeles termo responsivos híbridos que incorporaron gelatina de metacriloilo (GelMA) para la administración combinada de fármacos y células. Los hidrogeles mantuvieron una integridad mecánica y señales biológicas, demostrando la aplicación en la ingeniería de tejidos nerviosos y cicatrización de heridas (Viezuina et al., 2025).

En 2025, Radojkovic et al. dieron a conocer una perspectiva avanzada al sintetizar nano compuestos de hidrogeles bicapa que combinaban PNIPAM con alcohol polivinílico (PVA) reforzados con nano esferas de oro y nanorods. Estos hidrogeles demostraron un comportamiento foto térmico que permitío la activación y el movimiento mecánico mediante la luz. La síntesis por irradiación gamma garantizó tanto el entrecruzamiento de la red y la esterilización en un solo paso. Los resultados demostraron prometedoras aplicaciones en robótica, liberación de fármacos y dispositivos biomédicos inteligentes gracias a la flexión reversible inducida por luz verde o luz solar simulada (Radojković et al., 2025; Kawaguchi et al., 2020). Otro importante estudio es el de Stolic et al, los cuales sintetizaron hidrogeles a base de poli(etilenglicol)- (propilenglicol) metacrilato (EGPG) usando radiación gamma, e investigando diferentes proporciones de agua/etanol como co-solventes. Los resultados mostraron que el EGPG permitió modular la temperatura crítica inferior de disolución cercana a 32 °C, ideal para aplicaciones biológicas. Además, estos hidrogeles muestran un alto grado de hinchamiento a temperaturas bajas y colapsan a 37 °C, confirmando su comportamiento termo responsivo y su potencial uso en la administración de fármacos. El uso de radiación ionizante también permitió la formación simultánea de hidrogeles y su esterilización, agilizando el proceso de fabricación (Stolic et al. 2025; Dušek & Dušková-Smržová 2020).

Por su parte Giordano et al. desarrollaron hidrogeles multicomponentes a base de péptidos con propiedades termo responsivas, capaces de interactuar con ácidos nucleicos peptídicos para su liberación controlada. Estos materiales peptídicos, sobre todo los que incorporan secuencias funcionalizadas con 9-fluorenilmetiloxicarbonilo (FMOC), el cual es un grupo protector aromático que favorece el autoensamblaje mediante enlace π-π y las interacciones hidrófobicas demostrando transiciones reversibles y una liberación biomolecular sostenida. Este diseño supramolecular amplió el alcance de la utilidad de los hidrogeles en la terapia genética y las interfaces biotecnológicas, permitiendo un control preciso de la liberación de terapias basadas en ácidos nucleicos (Giordano et al., 2025; Zuckerman et al., 2020). Costa et al. estudiaron sistemas termogelantes inyectables basados en Pluronic F127, conocidos por su capacidad para formar micelas y experimentar transiciones reversibles sol-gel en respuesta a la temperatura. Estos hidrogeles se diseñaron para la liberación sostenida de ácido hialurónico. Su trabajo reveló que la adición de ácido hialurónico mejoraba significativamente la estabilidad del gel y la biocompatibilidad, formando hidrogeles que permanecían inyectables a bajas temperaturas y se solidifican rápidamente a temperatura fisiológica, una característica deseable para aplicaciones terapéuticas (Costa et al., 2025; Chaji et al., 2020; Pinelli et al., 2020). Finalmente, Pawlik et al. aportaron otra innovación al integrar derivados del ácido salicílico en redes poliméricas termo responsivas. Estos sistemas mostraron una doble capacidad de respuesta térmica y química liberando el agente activo ante ligeros cambios de temperatura y pH (Pawlik et al., 2025)

Hidrogeles pH sensibles

Los hidrogeles con respuestas al pH del medio (Figura 9) han atraído la atención en diversas aplicaciones biomédicas, estos aprovechan los gradientes naturales de pH que se encuentran en diferentes ambientes fisiológicos como el medio ácido de los tejidos inflamados o tumores, y la variación del pH en el tracto gastrointestinal lo que provoca un hinchamiento o deshinchamiento del hidrogel permitiendo la liberación del fármaco. Típicamente, están compuestos de poli electrólitos débiles, por ejemplo; quitosano, poli (ácido acrílico) y carboximetilcelulosa, cuyo estado de ionización se altera en función del pH, modulando el comportamiento de la red del hidrogel. Un ejemplo claro sobre la influencia del pH es el trabajo de Li et al, que diseñaron hidrogeles de doble red compuestos por 2-(2-metoxietoxi) metacrilato de etilo (MEO2MA), metacrilato de oligo(etilenglicol) (OEGMA) y metacrilato de 2-(dietilamino) etilo (DEAEMA); tres monómeros funcionales ampliamente conocidos por su comportamiento termo y pH sensible. El MEO2MA y el OEGMA son derivados hidrofílicos de los metacrilatos que contribuyen a la sensibilidad de la temperatura del comportamiento por un deshinchamiento súbito a una temperatura específica, mientras DEAEMA es un monómero catiónico que se protona en condiciones ácidas, proporcionando sensibilidad al pH al inducir el hinchamiento en microambientes ácidos (Li et al., 2025).

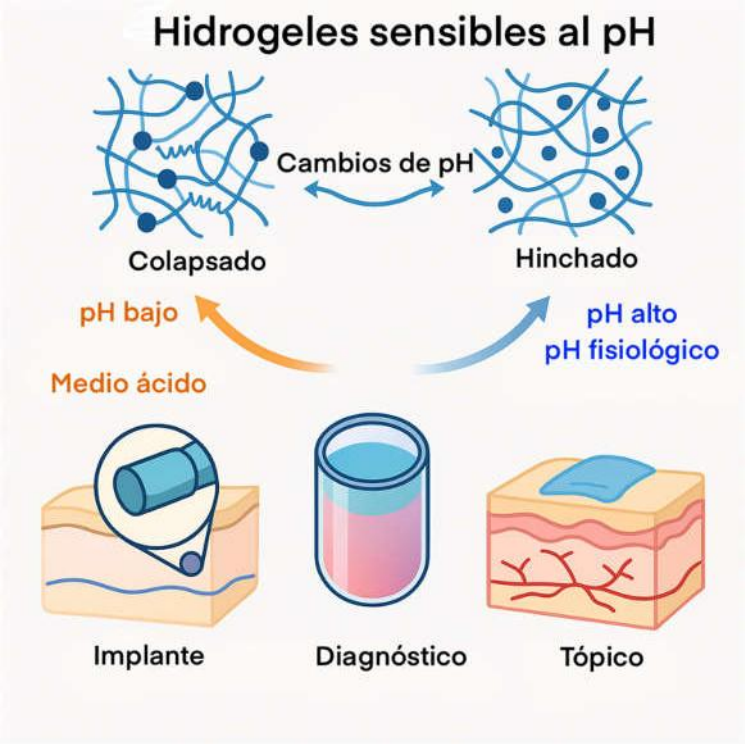


Figura 9. Comportamiento de los hidrogeles sensibles al pH. La sustancia activa se carga en el gel a un pH mayor y posteriormente se libera en un pH menor, por ejemplo, en el estómago.

Zhi et al. desarrollaron hidrogeles para indicador de pH basados en matrices de quitosano/PVA y almidón/PVA. Estos hidrogeles mostraron distintas respuestas colorimétricas en el intervalo de pH de 2-14, lo que permitió controlar visualmente la frescura de la carne de vacuno refrigerada. Su sensibilidad a las sutiles variaciones de pH, combinada con sus propiedades antioxidantes y su biocompatibildad, pusieron de manifiesto su potencial no sólo para la seguridad alimentaria, sino también para futuros vendajes destinados al tratamiento de heridas o diagnósticos biomédicos en los que una respuesta visible del pH podría ser fundamental (Zhi et al., 2025). Pisko et al. investigaron geles comerciales empleados en la liberación de flúor, el cual se usa en la prevención de la desmineralización y promover la remineralización de los tejidos dentales duros. Estos autores evaluaron cómo influía el pH y la concentración de iones de calcio en la liberación de flúor. Aunque no se trata de hidrogeles artificiales propiamente dicho, este estudio proporcionó una visión del mecanismo de las interacciones iónicas en distintas condiciones del pH, lo que reforzó el papel de éste en el control de la disponibilidad de fármacos y sugiere que las formulaciones sensibles al pH podrían ajustarse para mejorar la biodisponibilidad en aplicaciones de cuidado bucal (Piszko et al., 2025). Finalmente, en otro avance prometedor, Anantaworasakul et al. formularon geles tópicos basados en nanopartículas que incorporaban extractos de *Mitragyna speciosa*, los cuales demostraron no sólo una elevada biocompatibilidad, sino también estabilidad en un amplio rango de valores de pH, esencial para aplicaciones dérmicas y cosméticas. Aunque el estudio se centró en la actividad antioxidante e inhibidora de enzimas, respaldó indirectamente la utilidad de los sistemas de hidrogel resistentes al pH en aplicaciones de contacto con la piel, especialmente cuando pueden producirse variaciones de pH (por ejemplo, en pieles inflamadas o dañadas) (Anantaworasakul et al., 2025).

Hidrogeles sensibles a enzimas y redox

Los hidrogeles con respuesta enzimática y redox son sistemas poliméricos inteligentes diseñados específicamente para experimentar cambios estructurales o químicos en respuestas a señales bioquímicas como la actividad enzimática o los desequilibrios redox, ambos comúnmente asociados a condiciones patológicas como la inflamación, el estrés oxidativo o el cáncer. Estos hidrogeles ofrecen la ventaja de liberar fármacos en lugares específicos, lo que contribuye a la mejora la precisión terapéutica y minimizar los efectos secundarios sistémicos. En 2022, Sobczak realizó una revisión exhaustiva que puso de relevancia la creciente importancia de los hidrogeles sensibles a las enzimas en el diseño de sistemas de liberación de fármacos, en particular los activados por una matriz de metaloproteinasas (MMP), glucosa oxidasa o β-galactosidasa. Estos hidrogeles se construyeron con enlaces débiles para las enzimas como secuencias peptídicas o cadenas de polisacáridos, que se fragmentan en entornos patológicos (Sobczak et al., 2022). La degradación de la red de los hidrogeles en respuesta a la actividad enzimática específica permite la liberación controlada de agentes terapéuticos, lo que los hace adecuados para aplicaciones en el tratamiento de cáncer, el cuidado de heridas diabéticas y el control de la inflamación dirigída.

Por otro lado, Khodeir et al (2021), propusieron un novedoso diseño basado en hidrogeles con respuesta redox que incorporaban metacrilato de 2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxilo, (TEMPO) y metacrilato de oligo (etilenglicol) (OEGMA). El TEMPO, es un radical nitróxido estable comúnmente utilizado como mediador redox debido a su capacidad para cambiar reversiblemente entre los estados de oxidación y reducción. Cuando se incorporan covalentemente a la red del hidrogel, las unidades de TEMPO confieren un comportamiento redox sensible, que permite que el material experimente cambios estructurales o funcionales en entornos oxidativos o reductivos específicos. En este sistema, tales propiedades permitieron la liberación controlada por estímulos de fármacos modelo como la aspirina. Además, el hidogel redox activo mostró actividad catalítica, lo que amplió sus aplicaciones potenciales más allá de la administración de fármacos para incluir la biodetección y la actuación activada para redox (Khodeir et al., 2021).

Song et al (2021) profundizaron en el estudio de los geles como respuesta a medios oxidantes y analizaron hidrogeles sensibles al peróxido de hidrógeno (H_2O_2), un miembro clave de la familia de las especies reactivas del oxígeno (ROS). Las ROS son moléculas químicamente reactivas que contienen oxígeno como el anión superóxido (O_2-), el radical hidroxilo (-OH) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que se producen de forma natural en el organismo durante los procesos metabólicos, pero que aumentan en condiciones patológicas como la inflamación, el cáncer o el estrés oxidativo. Estos niveles elevados de ROS pueden aprovecharse como detonantes bioquímicos en el diseño de materiales inteligentes (Song et al., 2021).

Por último, Psarrou et al (2023) aportaron información sobre hidrogeles basados en polisacáridos que responden a una combinación de pH, actividad enzimática y señales redox. Los compuetos basados en quitosano, ácido hialurónico y otros polímeros naturales se formularon para servir como apósitos multifuncionales para heridas, capaces de ajustar su comportamiento de hinchamiento y liberar agentes antimicrobianos o regenerativos cuando se expone a señales fisiológicas típicas de las heridas crónicas. La interacción entre las ROS ambientales, la degradación enzimática y el pH localizado permitió un rendimiento del material receptivo adaptado a escenarios biológicos complejos (Psarrou et al., 2023).

Referencias

1. Jiang, Y., Li, H., Wang, X., & Wang, Y. (2023). A review of the development of biopolymer hydrogel-based systems for biomedical applications. ***Gels***, 11(3), 178. https://doi.org/10.3390/gels11030178
2. Nugroho, F. A. A., Rizky, F. S. A., Gozan, M., & Budiman, A. (2022). Novel trends in hydrogel development for biomedical applications. ***Polymers***, 14(15), 3023. https://doi.org/10.3390/polym14153023
3. Fan, L., Yang, J., Wu, H., Hu, Z., Yi, J., & Tong, C. (2022). Hydrogels: Properties and applications in biomedicine. ***Molecules***, 27(9), 2902. https://doi.org/10.3390/molecules27092902
4. Owens, D. E., Jian, Y., Fang, J. E., Slaughter, B. V., Chen, Y. H., & Peppas, N. A. (2007). Thermally responsive swelling properties of polyacrylamide/poly (acrylic acid) interpenetrating polymer network nanoparticles. ***Macromolecules***, *40*(20), 7306-7310.
5. Ho, T. C., Pelton, R., & Huson, M. G. (2022). Hydrogels: Properties and Applications in Biomedicine. ***Molecules***, *27*(9), 2902. https://doi.org/10.3390/molecules27092902
6. Zhang, Z., Liu, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2018). Influence of Network Structure on the Crystallization Behavior of PEG-Based Hydrogels. ***Polymers***, *10*(9), 970. https://doi.org/10.3390/polym10090970
7. Hou, Y., Huang, Y., Ma, Y., Shuai, X., Shen, J., & Yang, W. (2022). *Construction and Ion Transport-Related Applications of the Hydrogels*. ***Polymers***, *14*(19), 4037. https://doi.org/10.3390/polymers14194037
8. Gori, M., Donnadio, A., Iacopetti, P., Basoli, F., Zuppolini, S., & Lamberti, A. (2022). A soft zwitterionic hydrogel as potential coating on implantable neuroprostheses. ***Molecules***, *27*(10), 3126. https://doi.org/10.3390/molecules27103126
9. Xie, M., Liu, Q., Liu, X., Li, C., Zhang, Q., & Zhang, Q. (2024). Hydrogel composites for multifunctional biomedical applications. ***Materials***, 8(4), 154. https://doi.org/10.3390/ma8040154
10. Omidian, H., Chowdhury, S. D., & Wilson, R. L. (2024). Advancements and Challenges in Hydrogel Engineering for Regenerative Medicine. ***Gels***, 10(4), 238. https://doi.org/10.3390/gels10040238
11. Giordano, S., Terracciano, M., Gallo, E., Diaferia, C., Falanga, A. P., Accardo, A., Franzese, M., Salvatore, M., Piccialli, G., Borbone, N., & Oliviero, G. (2025). Investigating the interactions of peptide nucleic acids with multicomponent peptide hydrogels for the advancement of healthcare technologies. Gels, 11(5), 367. https://doi.org/10.3390/gels11050367
12. Dell, A. C., Wagner, G., Own, J., & Geibel, J. P. (2022). 3D Bioprinting Using Hydrogels: Cell Inks and Tissue Engineering Applications. ***Pharmaceutics***, 14(12), 2596. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14122596
13. Mohan, A., Santhamoorthy, M., Phan, T. T. V., & Kim, S.-C. (2024). NIPAm-Based pH and Thermoresponsive Copolymer Hydrogel for Hydrophobic and Hydrophilic Drug Delivery. **Gels**, 10(2), 184. https://doi.org/10.3390/gels10020184
14. Rafael, D., Melendres, M. M. R., Andrade, F., Montero, S., Martinez-Trucharte, F., Vilar-Hernandez, M., Durán-Lara, E.F., Schwartz Jr, S., & Abasolo, I. (2021). Thermo-Responsive Hydrogels for Cancer Local Therapy: Challenges and State-of-Art. ***Int. J. Pharm.***, 606, 120954. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120954
15. Sipos, B., Budai-Szűcs, M., Katona, G., & Csóka, I. (2025). Gellan Gum-Based In Situ Hydrogels for Nasal Delivery of Polymeric Micelles Loaded with Risperidone. ***Gels***, *11*(6), 404. https://doi.org/10.3390/gels11060404
16. Varughese, A., Sekhar, S. S., & Radhakrishnan, E. K. (2025). Development and Characterization of Chitosan-Based In Situ Gelling Systems for Periodontal Drug Delivery. ***Gels***, *11*(3), 281.

https://doi.org/10.3390/gels11030281
17. Encinas-Basurto, D., Ruiz, V. H., Schnellmann, R. G., & Mansour, H. M. (2025). Evaluation of Carboxymethyl Chitosan–Genipin Hydrogels as Reservoir Systems for Suramin Delivery in Epithelial Tissues. ***Gels**, 11*(5), 312. https://doi.org/10.3390/gels11050312
18. Rhinow, R., Franco, M. K. K. D., Vollrath, M. K., Kellermann, G., & Yokaichiya, F. (2025). Poloxamer-Driven Drug Delivery System for Anti-Inflammatory Drugs Using Small-Angle Neutron Scattering Approach. ***Gels**, 11*(6), 410. https://doi.org/10.3390/gels11060410
19. Plugariu, D.-V., Zgura, I., Mihaila, I., Bucur, B., Iovu, H., & Vasile, B. S. (2025). Injectable thermo-sensitive hydrogel based on graphene oxide functionalized with hyaluronic acid for local release of ketorolac tromethamine. ***Pharmaceutics***, 17(2), 360. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17020360.
20. Esparza-Villalpando, V., Pozos-Guillén, A., Vértiz-Hernández, Á. A., Vega-Baudrit, J., & Chavarría-Bolaños, D. (2025). Design of a dual-drug delivery system for local release of chlorhexidine and dexketoprofen. ***Polymers***, 17(13), 1771. https://doi.org/10.3390/polym17131771.
21. Viezuina, D.-M., Musa, I., Aldea, M., Matache, I.-M., Rotaru Zavaleanu, A.-D., Gresita, A., Veronica, S., & Mitran, S. I. (2025). Gelatin-based hydrogels for peripheral nerve regeneration: A multifunctional vehicle for cellular, molecular, and pharmacological therapy. ***Gels***, 11(7), 490. https://doi.org/10.3390/gels11070490.
22. Radojković, N., Spasojević, J., Vukoje, I., Kačarević-Popović, Z., Stamenović, U., Vodnik, V., Roglić, G., & Radosavljević, A. (2025). Gamma irradiation-induced synthesis of nano Au-PNiPAAm/PVA bi-layered photo-thermo-responsive hydrogel actuators with a switchable bending motion. ***Polymers***, 17(13), 1774. https://doi.org/10.3390/polym17131774
23. Kawaguchi, H. (2020). On going to a new era of microgel exhibiting volume phase transition. ***Gels**, 6*(3), 26. https://doi.org/10.3390/gels6030026
24. Stolic, A., Rogic Miladinovic, Z., Krstic, M., Stamboliev, G., Petrovic, V., & Suljovrujic, E. (2025). Radiation-induced synthesis of polymer networks based on thermoresponsive ethylene glycol propylene glycol monomers. ***Gels***, 11(7), 488. https://doi.org/10.3390/gels11070488
25. Dušek, K., & Dušková-Smržová, M. (2020). Volume phase transition in gels: Its discovery and development. ***Gels**, 6*(3), 22. https://doi.org/10.3390/gels6030022
26. Zuckerman, S. T., Rivera-Delgado, E., Haley, R. M., Korley, J. N., & von Recum, H. A. **(**2020). Elucidating the structure-function relationship of solvent and cross-linker on affinity-based release from cyclodextrin hydrogels. ***Gels**, 6*(1), 9. https://doi.org/10.3390/gels6010009
27. Costa, M. C. M., Silva, S. M. C., Almeida, L. C., & Antunes, F. E. (2025). Injectable and printable thermoresponsive hydrogel composites reinforced with nanoclays for biomedical applications. ***Gels***, 11(4), 312. https://doi.org/10.3390/gels11040312.
28. Chaji, S., Al-Saleh, J., & Gomillion, C. T**.** (2020). Bioprinted three-dimensional cell-laden hydrogels to evaluate adipocyte–breast cancer cell interactions. ***Gels**, 6*(1), 10. https://doi.org/10.3390/gels6010010
29. Pinelli, F., Perale, G., & Rossi, F. (2020). Coating and functionalization strategies for nanogels and nanoparticles for selective drug delivery. ***Gels**, 6*(1), 6. https://doi.org/10.3390/gels6010006
30. Pawlik, A., Malina, D., Strzelecka, M., & Tomczykowa, M. (2025). Thermoresponsive hydrogels based on poly(N-isopropylacrylamide) for controlled drug delivery systems. ***Gels***, 11(1), 45. https://doi.org/10.3390/gels11010045.
31. Li, Y., Wang, J., & Liu, S. (2025). Synthesis of Temperature/pH Dual-Responsive Double-Crosslinked Hydrogel on Medical Titanium Alloy Surface. ***Gels***, 11(6), 443. https://doi.org/10.3390/gels11060443.
32. Zhi, Y., Zhang, Q., & Cao, J. (2025). pH-Responsive Injectable Hydrogels for Localized Cancer Therapy: Strategies and Applications. ***Gels***, 11(5), 370. https://doi.org/10.3390/gels11050370
33. Piszko, P. J., Kulus, M., Piszko, A., Kiryk, J., Kiryk, S., Kensy, J., Małyszek, A., Michalak, M., Dobrzyński, W., Matys, J., & Dobrzyński, M. (2025). The Influence of Calcium Ions and pH on Fluoride Release from Commercial Fluoride Gels in an In Vitro Study. ***Gels***, 11(7), 486. https://doi.org/10.3390/gels11070486
34. Anantaworasakul, P., Preedalikit, W., Anantaworasakul, P., Singh, S., Intharuksa, A., Arunotayanun, W., Na Takuathung, M., Yotsawimonwat, S., & Chittasupho, C. (2025). Phytochemical Characterization, Bioactivities, and Nanoparticle-Based Topical Gel Formulation Development from Four Mitragyna speciosa Varieties. ***Gels***, 11(7), 494.

https://doi.org/10.3390/gels11070494
35. Sobczak, M. (2022). Enzyme-responsive hydrogels as potential drug delivery systems—State of knowledge and future prospects. ***Int. J. Mol. Sci.***, *23*(8), 4421. https://doi.org/10.3390/ijms23084421
36. Khodeir, M., Jia, H., Vlad, A., & Gohy, J.-F. (2021). Application of redox-responsive hydrogels based on 2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinyloxy methacrylate and oligo(ethyleneglycol) methacrylate in controlled release and catalysis. ***Polymers***, *13*(8), 1307. https://doi.org/10.3390/polym13081307
37. Song, W., You, J., Zhang, Y., Yang, Q., Jiao, J., & Zhang, H. (2022). Recent studies on hydrogels based on H_2O_2-responsive moieties: Mechanism, preparation and application. ***Gels***, *8*(6), 361. https://doi.org/10.3390/gels8060361
38. Psarrou, M., Mitraki, A., Vamvakaki, M., & Kokotidou, C. (2023). Stimuli-responsive polysaccharide hydrogels and their composites for wound healing applications. ***Polymers***, *15*(4), 986. https://doi.org/10.3390/polym15040986

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

Recibido 23 Nov. 2025
Aceptado 24 Nov. 2025
ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025

AI-Driven Adaptive Learning in Educational Games

Aprendizaje Adaptativo Impulsado por Inteligencia Artificial en Juegos Educativos

Michel Lopez-Franco[1]
michel.lopez@academicos.udg.mx
Dariana Gomez Alvarez[1]
David Bonilla Carranza[1]
Carlos Lopez Franco[1]
Lilibet Lopez Franco[1]

[1] Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco 44430, Mexico

Abstract. Artificial intelligence is transforming educational games by enabling adaptive learning experiences that respond to individual learners' needs in real time. This paper presents an integrative review of recent literature on AI-driven adaptivity in educational games, examining how these systems personalize instruction, enhance engagement, and improve learning outcomes. Core AI techniques—including learner modeling, reinforcement learning, procedural content generation (PCG), and affective computing—are discussed in relation to frameworks such as Flow theory and the Mechanics–Dynamics–Aesthetics (MDA) model. Representative case studies, including Math Garden and CodeCombat, illustrate how adaptive mechanics and narrative integration influence learner motivation and performance. Beyond pedagogical benefits, we analyze challenges such as algorithmic bias, data privacy, and transparency, underscoring the importance of explainable and inclusive design. Emerging trends—such as large language models, extended reality, and co-adaptive systems—are also reviewed, alongside practical recommendations for educators, developers, and policymakers. Our findings suggest that ethically designed, pedagogically grounded AI-enhanced educational games can provide scalable and engaging alternatives to traditional instruction.

Resumen. *La inteligencia artificial está transformando los juegos educativos al permitir experiencias de aprendizaje adaptativo que responden a las necesidades individuales de los estudiantes en tiempo real. Este artículo presenta una revisión integradora de la literatura reciente sobre la adaptabilidad impulsada por la IA en los juegos educativos, examinando cómo estos sistemas personalizan la instrucción, mejoran la participación y optimizan los resultados de aprendizaje. Se discuten las técnicas centrales de la IA —incluyendo el modelado del estudiante, el aprendizaje por refuerzo, la generación de contenido procedimental (PCG) y la computación afectiva— en relación con marcos teóricos como la teoría del Flujo y el modelo Mecánicas– Dinámicas–Estéticas (MDA). Casos de estudio representativos, como Math Garden y CodeCombat, ilustran cómo la mecánica adaptativa y la integración narrativa influyen en la motivación y el rendimiento del estudiante. Más allá de los beneficios pedagógicos, se analizan desafíos como el sesgo algorítmico, la privacidad de los datos y la transparencia, enfatizando la importancia de un diseño explicable e inclusivo. También se revisan las tendencias emergentes*
—como los grandes modelos de lenguaje, la realidad extendida y los sistemas co-adaptativos—
, junto con recomendaciones prácticas para educadores, desarrolladores y responsables políticos. Nuestros hallazgos sugieren que los juegos educativos mejorados con IA, diseñados éticamente y con fundamentos pedagógicos, pueden ofrecer alternativas escalables y atractivas a la instrucción tradicional.

Keywords: Artificial Intelligence, Adaptive Learning, Educational Games, Personalization, Ethics in EdTech

Palabras clave: *Inteligencia Artificial, Aprendizaje Adaptativo, Juegos Educativos, Personalización, Ética en Tecnología Educativa*

1 Introduction

The landscape of educational technology has undergone a major transformation in recent years, driven by advances in artificial intelligence and the growing recognition of the importance of personalized learning. Traditional approaches, often characterized by one-size-fits-all instruction, show limitations in addressing the diverse needs, learning styles, and paces of individual students [1]. This has led to increased interest in adaptive learning systems capable of dynamically adjusting to each learner's progress and preferences.

Educational games have emerged as a powerful medium for meaningful learning. According to Protopsaltis et al. [2], serious games combine instructional content with entertaining and cognitively engaging elements, encouraging students to become involved both emotionally and personally. This blend of education and entertainment has been shown to enhance motivation, engagement, and learning outcomes [3]. Prensky [4] emphasized that incorporating game elements into learning makes the process not only more enjoyable but also more effective.

The integration of artificial intelligence into educational games represents a step forward in overcoming the limitations of static instruction. AI-driven adaptive systems can monitor learner interactions, performance metrics, and behavioral indicators to provide real-time personalization [5]. These mechanisms allow games to adjust difficulty, pacing, and feedback dynamically, while also raising new challenges such as the risk of cognitive overload or reduced learner agency when adaptation is excessive.

These approaches are particularly valuable in addressing contemporary educational challenges. Modern classrooms must accommodate diverse populations with varying abilities and learning preferences. Traditional instruction often struggles to provide individualized attention for all students. AI-enhanced educational games offer a scalable solution by delivering personalized experiences that sustain engagement while adapting to individual learner characteristics.

The effectiveness of game-based learning has been validated by meta-analyses and systematic reviews. Research demonstrates that well-designed educational games improve outcomes compared to traditional methods [6]. Motivational elements such as challenge, achievement, and interactivity contribute to sustained engagement and persistence [7]. Yet, the development and implementation of adaptive systems present technical and ethical challenges, including data privacy, algorithmic fairness, and equitable access [8].

This paper examines the current state of AI-driven adaptive learning in educational games, synthesizing findings from recent systematic reviews and empirical studies. The objective is to provide an overview of how AI technologies are being integrated into games to create adaptive learning experiences, evaluate their effectiveness, and identify key challenges and future directions. The remainder of the paper is structured as follows: Section 2 provides theoretical foundations and a literature review, Section 3 outlines the methodology, Section 4 presents analysis and discussion, Section 5 addresses ethical considerations, Section 6 explores future directions and recommendations, and Section 7 offers concluding remarks.

2 Theoretical Foundation and Literature Review

2.1 Foundations of Adaptive Learning

Adaptive learning refers to the use of technology to modify educational content and interactions based on the individual characteristics, behaviors, and needs of learners. Rooted in constructivist learning theory, adaptive systems tailor the learning experience by analyzing learner data to make real-time decisions about what, how, and when content is delivered. Unlike traditional instruction, these approaches enable personalized pathways that respond directly to a student's performance, preferences, and pace of learning [1].

The theoretical underpinnings of adaptive learning often draw from cognitive and behavioral models, such as Vygotsky's Zone of Proximal Development and Bloom's Mastery Learning theory. These frameworks highlight the importance of scaffolding and differentiation in achieving optimal outcomes. By integrating artificial intelligence (AI), adaptive systems operationalize these concepts through automated analysis of learner inputs and dynamic adjustment of interventions. In e-learning, early adaptive environments relied mainly on indicators such as quiz scores, completion rates, or time-on-task. As El-Sabagh [1] observes, these measures often fail to capture the complexity of learner variability. More recent models incorporate engagement patterns, learning styles, and emotional responses, enabling richer learner profiles and more effective adaptations. Gligorea et al. [5] provide a comprehensive review of AI techniques used in adaptive learning, noting decision trees, Bayesian networks, and neural networks as central technologies. These methods support learner models that continuously update with new data, refining content delivery over time. This real-time adjustment fosters not only improved academic performance but also learner autonomy and motivation—two pillars of meaningful engagement. Importantly, adaptive learning is not limited to content sequencing. It also encompasses variation in feedback, pacing, interface complexity, and scaffolding levels. Such flexibility supports inclusive education by adjusting to both cognitive and affective learner variables. However, excessive adaptation can risk cognitive overload or diminish learner agency, making it necessary to balance personalization with opportunities for exploration and challenge. Thus, the theoretical foundation of adaptive learning lies at the intersection of educational psychology and intelligent systems.

When integrated into educational games, these systems combine personalization with the motivational affordances of gameplay, aligning with frameworks such as Flow and PENS to sustain engagement and deepen learning—an intersection further explored in the following sections.

2.2 Educational Games: Design and Learning Theories

Educational games, often referred to as serious games or digital game-based learning (DGBL) environments, combine the engaging qualities of games with the intentionality of pedagogical design. Protopsaltis et al. [2] define serious games as environments that integrate instructional content within interactive, entertaining, and cognitively engaging experiences. By embedding learning objectives in game-based contexts, these tools promote not only knowledge acquisition but also emotional and personal investment in the learning process.

The design of educational games is grounded in constructivist and experiential learning theories. These theories posit that learners construct knowledge through active engagement with tasks, situated contexts, and iterative experimentation. Erhel and Jamet [3] emphasize that DGBL environments can enhance learning effectiveness, particularly when clear instructional guidance is provided alongside the game mechanics. Game-based learning supports exploration, failure, and retry within safe virtual environments, facilitating the development of higher-order thinking and self-regulated learning.

Prensky [4] was among the first to argue that digital games offer a natural alignment with effective teaching strategies. He proposed that elements such as immediate feedback, progressive difficulty, and embedded goal structures mirror the mechanisms that facilitate deep learning. These principles are echoed in McLaren and Nguyen's work [9], which highlights how digital games—when well designed—can serve as complex learning environments that blend content mastery with strategic thinking and motivation.

A fundamental theoretical foundation in the design of educational games is self-determination theory (SDT), which identifies competence, autonomy, and relatedness as key psychological needs [7]. Games are particularly well-suited to satisfy these needs through structured challenges, voluntary participation, and social interaction. As Admiraal et al. [7] note, collaborative game-based learning fosters a sense of flow—a state of deep engagement that emerges when learners are fully immersed in an activity that balances skill level and challenge.

This is further supported by Sailer and Homner [6], who found that game fiction and collaborative-competitive mechanics are significant moderators in enhancing behavioral outcomes in gamified learning environments.Moreover, game design often incorporates scaffolding strategies derived from Vygotsky's zone of proximal development and Bloom's taxonomy, guiding learners from basic understanding to complex problem-solving. In this context, learners are not passive recipients of information but active participants in meaning-making processes. Liao et al. [10], in a review of game-based learning in computer science education, stress the importance of aligning in-game tasks with curricular goals and providing cognitive supports such as hints, feedback, and conceptual maps. Serious games also facilitate learning transfer, particularly when embedded in realistic or narrative-driven contexts. According to De Gloria et al. [11], game-based learning environments allow for situated cognition, where learners engage with content in a simulated, yet authentic, manner.

This authenticity enhances relevance, encourages reflection, and supports the application of knowledge beyond the game itself.

However, the educational impact of games depends critically on instructional coherence and intentionality. As noted by Sailer and Homner [6], not all gamified or game-based interventions yield consistent learning gains—particularly when game mechanics are used superficially or without integration into pedagogical goals. Clark et al. [as cited in 6] found that combining competition with collaboration and embedding meaningful narratives can significantly enhance the effectiveness of educational games.

In sum, the design and implementation of educational games are deeply informed by learning theories that prioritize active, contextual, and socially mediated learning. When enriched with narrative structures, adaptive pacing, and motivational feedback, these games can cultivate both academic competencies and learner engagement. The integration of artificial intelligence into these environments, discussed in the following sections, enhances their capacity to personalize instruction and respond dynamically to individual learner profiles.

2.3 AI Technologies in Educational Contexts

AI has become a transformative force in education, enabling the development of adaptive, personalized, and scalable learning environments. In educational games, AI technologies provide the backbone of adaptation by monitoring learner behaviors, interpreting cognitive and affective states, and modifying the environment accordingly. These intelligent systems orchestrate content, feedback, difficulty levels, and pedagogical strategies in real time, aligning instructional delivery with individual learner needs [5].

Adaptive learning systems generally rely on three core components: the learner model, the domain (or content) model, and the instructional model. The learner model captures real-time data such as performance metrics, interaction history, behavioral trends, and sometimes motivational states. The domain model represents the structure of the content to be learned, while the instructional model defines the strategies used to personalize the experience. Gligorea et al.

[5] note that decision trees, Bayesian networks, fuzzy logic, and neural networks are commonly employed to link these components and produce intelligent pedagogical responses.

McLaren and Nguyen [9] argue that AI extends the capabilities of traditional educational software by enabling deeper interactivity. For example, AI-enhanced learning games can provide real-time scaffolding, targeted hints, or adaptive challenges that adjust dynamically to a learner's mastery trajectory. By calibrating task difficulty in this way, systems aim to sustain learners in a state of flow [7].

More advanced applications employ PCG, where new game levels, quests, or challenges are automatically created according to the learner's evolving profile. De Gloria et al. [11] highlight that PCG not only supports personalization but also reduces the design burden for educators and developers. Emotional AI—systems that detect and respond to affective states such as frustration or boredom—is also increasingly used to fine-tune feedback and prevent disengagement.

AI technologies further support predictive analytics, enabling systems to forecast learner success, identify misconceptions, or detect early signs of dropout risk. These models can guide
timely interventions and more targeted instructional planning, though their effectiveness depends on the quality, granularity, and ethical use of data.

Despite these advances, limitations persist. Many systems still operate within narrow domains, requiring handcrafted models or large datasets to achieve meaningful personalization. Gligorea et al. [5] also observe that current AI systems often lack transparency, making it difficult for educators and learners to understand or challenge automated decisions—a concern that raises questions of fairness and accountability, further discussed in Section 5.

In summary, AI empowers educational games to act as intelligent learning companions capable of offering rich, context-aware, and individualized experiences. This integration brings education closer to the long-held ideal of one-on-one tutoring at scale. However, its promise must be tempered by attention to transparency, learner agency, and ethical safeguards.

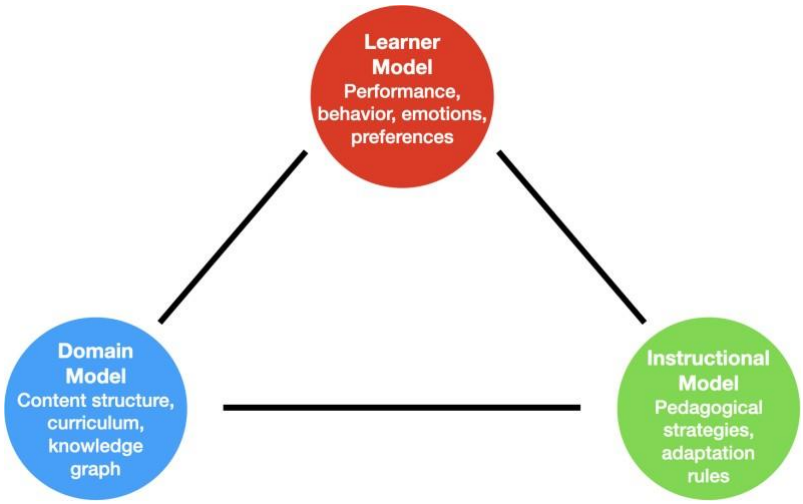


Fig. 1. The triadic architecture of adaptive learning systems, showing the interaction between the Learner Model, Domain Model, and Instructional Model.

2.4 Integration of AI and Educational Games

The integration of AI into educational games represents a major step toward creating intelligent learning environments capable of real-time personalization and adaptive support. While educational games have already demonstrated their ability to enhance motivation, engagement, and outcomes through interactivity and narrative [2][4][6], the incorporation of AI extends these benefits by enabling systems to adapt dynamically to individual learner behaviors, needs, and performance [5][9][11].

AI-enhanced games rely on the synergy between learner modeling, game mechanics, and data analytics. These systems collect in-game interaction data—such as response times, choice patterns, or success rates—and use algorithms including neural networks, Bayesian models, and decision trees to interpret learner states and deliver tailored interventions [5][9]. As Pérez et al.
[12] note, this creates a foundation for scalable and continuous assessment mechanisms that provide insight into human learning and behavior.

This adaptive capability allows games to deliver differentiated challenges, feedback, and progression in real time. Tasks can be calibrated according to mastery level, cognitive load, or signs of disengagement [5][9][11]. These mechanisms align closely with Flow theory [7][6] and are further illuminated by the MDA framework and PENS model, which explain how mechanics and adaptive dynamics sustain motivation by addressing competence, autonomy, and relatedness.

In addition to dynamic personalization, AI supports PCG, where new levels, scenarios, or narratives are created to match a learner's trajectory. De Gloria et al. [11] and Pérez et al. [12] highlight how PCG provides both novelty and

instructional alignment. Recent advances include the use of reinforcement learning agents and large language models (LLMs) to generate adaptive dialogues and branching narratives [12][9].

Beyond instructional delivery, AI-driven games contribute to system optimization through continuous learning analytics. According to Liao et al. [10] and Sachete et al. [13], fine-grained gameplay data can be mined to evaluate learner progression, refine game design, and personalize instruction at scale. These approaches are increasingly applied across domains, from STEM education [14] to vocational training and mental health interventions [12].

Despite their promise, challenges remain. Transparency and explainability are persistent concerns, as learners and educators may struggle to understand why a game adapts in certain ways [5][8][12]. Over-personalization can also reduce learner agency or diminish the sense of discovery, while poorly calibrated adaptations risk causing disengagement or cognitive overload [12][11]. Equity is another challenge: as Schneider et al. [8] warn, bias in training data or algorithms can perpetuate educational inequities if not addressed.

In conclusion, the fusion of AI and educational games enables personalized, engaging, and data-informed learning experiences. Through adaptive mechanics, intelligent feedback, and real- time analytics, these systems have the potential to meet diverse learner needs while retaining the motivational strengths of gameplay. Realizing this potential, however, requires ethical design, interdisciplinary collaboration, and robust evaluation frameworks to ensure transparency, fairness, and inclusivity.

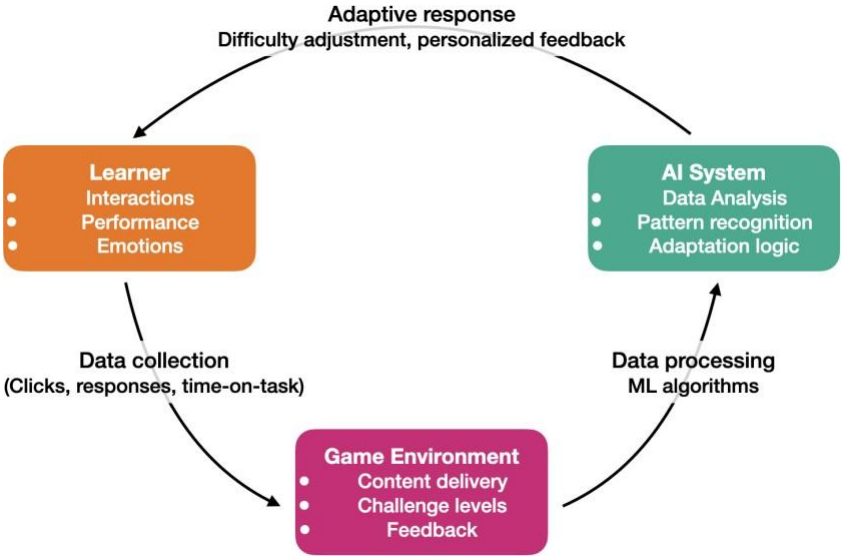


Fig. 2. Adaptive learning cycle in educational games, where learner data is processed by the AI system to adjust the game environment in real time.

3 Methodology

3.1 Research Approach

This study employs a qualitative integrative review methodology to synthesize and critically analyze recent scholarly literature on the intersection of artificial intelligence, adaptive learning,
and educational games. The integrative review approach is particularly suited for emerging interdisciplinary fields where theoretical and empirical findings are dispersed across domains such as education, artificial intelligence, learning sciences, and game studies. This method allows for the inclusion of diverse study designs-empirical, theoretical, systematic reviews, and meta- analyses-to construct a comprehensive understanding of AI-driven adaptive educational games and their implications.

The research is grounded in a constructivist-interpretivist paradigm, which recognizes that learning processes are deeply contextual, socially constructed, and influenced by learner interaction with dynamic systems. As such, the reviewed studies were selected not only for their technological contributions but also for their alignment with pedagogical theory, learner modeling approaches, and ethical concerns within adaptive educational environments.

A multi-stage review process was used, inspired by Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) principles where applicable [13][15]. First, 15 peer- reviewed documents-ranging from empirical studies to literature reviews and meta-analyses-were analyzed. These were drawn from domains including AI in education [5][9], adaptive systems [1][5][13], serious and game-based learning [2][3][6][11][12][14], ethical considerations in educational AI [8], and computational social science [12]. Preference was given to documents published between 2018 and 2024 to ensure relevance and contemporaneity, although foundational works (e.g., Prensky [4]) were retained for theoretical grounding.

Each document was reviewed using a thematic analysis framework. The coding categories included:

- AI technologies and algorithms used (e.g., neural networks, reinforcement learning)
- Models of adaptation (e.g., learner models, pacing strategies, procedural generation)

- Educational game design frameworks
- Learning outcomes and engagement metrics
- Ethical, equity, and transparency considerations

This approach allowed us to identify cross-cutting themes, patterns, and tensions across studies, and to develop a cohesive narrative regarding the opportunities and challenges of integrating AI in adaptive educational games.

Furthermore, this study draws from meta-analytical findings (e.g., Sailer & Homner [6]; Wang et al. [14]) and systematic reviews (e.g., Sachete et al. [13]; Liao et al. [10]) to ground claims about learning effectiveness and system design. The inclusion of both quantitative syntheses and qualitative conceptual frameworks enables triangulation of findings and supports a more holistic view of the current state of the field.

In summary, this research approach emphasizes interpretive synthesis over empirical experimentation, aiming to construct a conceptual scaffold that informs future research, design, and implementation of AI-enhanced adaptive educational games.

3.2 Search Strategy

The literature search strategy was designed to ensure broad coverage of scholarly works at the intersection of artificial intelligence, adaptive learning, and educational games. The process was guided by principles adapted from the PRISMA framework, which is widely used in educational technology research to promote transparency and reproducibility [13][15].

Searches were conducted in IEEE Xplore, ACM Digital Library, SpringerLink, ScienceDirect, and Scopus, selected for their strong coverage of computer science, education, and interdisciplinary fields. Results were limited to English-language, peer-reviewed publications published between 2015 and 2024, with foundational works such as Prensky [4] included for theoretical completeness.

The search strategy employed Boolean logic to combine three concept clusters:

- Artificial Intelligence terms: ("artificial intelligence" OR "AI" OR "machine learning" OR "neural network" OR "adaptive system")
- Educational Games and Gamification terms: ("educational game" OR "serious game" OR "digital game-based learning" OR "gamification")
- Adaptivity and Personalization terms: ("adaptive learning" OR "personalized learning" OR "intelligent tutoring" OR "learner model" OR "adaptive feedback")

An example full search string used in Scopus was: ("artificial intelligence" OR "machine learning") AND ("educational game" OR "serious game") AND ("adaptive learning" OR "personalized learning")

The initial search yielded 276 articles, consistent with results reported by Sachete et al. [13]. After removing duplicates, titles and abstracts were screened for relevance. Inclusion criteria focused on:

- Use of AI for adaptivity or personalization in learning systems
- Game-based or gamified learning environments with adaptive components
- Pedagogical or ethical analysis of AI-driven educational tools Exclusion criteria were:
- Non-educational AI applications (e.g., industrial or healthcare uses without pedagogical context)
- Studies limited to usability without learning outcomes
- Opinion pieces or non-peer-reviewed literature

The final corpus comprised 15 documents, including empirical validations (e.g., Wang et al. [14]; Erhel & Jamet [3]), meta-analyses (e.g., Sailer & Homner [6]), system architecture overviews (e.g., Gligorea et al. [5]), and ethical frameworks (e.g., Schneider et al. [8]). While this purposive sample captures a spectrum of approaches across design, implementation, and evaluation, the relatively small number of empirical studies limits generalizability and highlights the need for broader future reviews.

This approach supports the integrative nature of the study, ensuring that findings are drawn from diverse, credible sources spanning technical, pedagogical, and ethical dimensions of AI- driven adaptive educational games.

3.3 Quality Assessment

To ensure rigor and credibility, a structured quality assessment was applied to all selected studies. Given the interdisciplinary nature of AI-driven adaptive educational games, the criteria were designed to evaluate both methodological soundness and pedagogical relevance across quantitative, qualitative, mixed-methods, meta-analyses, and system reviews.

A dual framework was adopted, drawing on:

- The Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) for empirical studies, evaluating clarity of research questions, appropriateness of design, sampling, data collection integrity, and coherence of findings.
- The Critical Appraisal Skills Programme (CASP) for theoretical papers and reviews, assessing clarity of objectives, conceptual contribution, transparency of methods, and practical relevance.

Each document was scored on a 5-point rubric across five categories:

1. Research Design Appropriateness – Suitability of methods for the stated questions or goals [6][10][14].
2. Evidence of Educational Impact – Strength of findings on outcomes such as motivation, engagement, or learning [3][6][14].
3. Transparency and Replicability – Clarity in reporting data collection and analysis [5][9][10].
4. AI Implementation Specificity – Precision in describing adaptation methods (e.g., learner modeling, feedback, procedural generation) [5][9][11][13].

5. Pedagogical and Design Alignment – Consistency with learning theories (constructivism, Flow, SDT) and, where relevant, game evaluation frameworks such as the MDA model, PENS, or GEQ [2][4][7][9].

Only studies that scored at least 3 out of 5 in all categories were retained. This threshold ensured that novel or exploratory work contributed meaningfully while maintaining a baseline of academic quality.

The quality assessment also guided the weighting of evidence during thematic analysis. Higher-scoring empirical studies and meta-analyses (e.g., Sailer & Homner [6]; Wang et al. [14]) shaped generalizable claims, while conceptual contributions (e.g., Prensky [4]; McLaren & Nguyen [9]) grounded theoretical interpretation. Author credibility, citation count, and publication venue were also considered as secondary indicators of scholarly impact.

Although this process ensured transparency, it also highlighted a limitation: relatively few studies included direct usability or engagement metrics, indicating a need for future research that complements conceptual synthesis with empirical validation. This multi-criteria approach nonetheless provides a defensible foundation for the integration and discussion of evidence in subsequent sections.

4 Analysis and Discussion

4.1 AI Techniques in Adaptive Educational Games

The application of artificial intelligence techniques in adaptive educational games is central to enabling real-time personalization and intelligent instructional decision-making. Across the reviewed literature, a wide array of algorithms and models are employed to support learner modeling, content adaptation, and feedback generation—functions that distinguish adaptive games from static digital tools [5][9][11].

One of the earliest approaches is rule-based reasoning, which uses predefined rules to interpret learner inputs and adjust responses. These systems are simple and interpretable but lack flexibility and scalability in open-ended learning scenarios [5].

To overcome this, machine learning (ML) techniques such as decision trees, Bayesian networks, and support vector machines (SVMs) have been introduced. These models infer patterns from gameplay data—such as error frequency, response times, or action sequences— and adapt difficulty levels, hints, or learning paths accordingly. For example, in the Math Garden game studied by Brinkhuis et al., cited in Chiotaki et al. [15], an Elo rating system combined with response time analysis was used to estimate student ability and calibrate task difficulty.

Artificial neural networks (ANNs), particularly recurrent neural networks (RNNs), extend these capabilities by learning temporal dependencies in player behavior, such as how prior mistakes influence future actions. They support intelligent feedback loops and performance predictions in more advanced adaptive systems [5][12].

Reinforcement learning (RL) has also been applied to optimize adaptive policies. Here, an AI agent learns strategies for intervention by receiving feedback on learner progress and engagement over time [11][12]. RL has been used to balance challenge and support in open- world or sandbox-style games, where maintaining Flow is essential.

PCG represents another key technique. PCG refers to algorithms that automatically generate new levels, quests, or challenges tailored to a learner's evolving profile. De Gloria et al. [11] and Pérez et al. [12] highlight how this supports scalability and novelty, while reducing the burden on developers. Recent advances include generative AI models capable of adapting narratives and dialogues dynamically.

Affective computing, or emotional AI, uses methods such as computer vision or biometric signals to detect states like frustration or boredom and adapt the game accordingly [12][13]. For example, Tsai et al. (2012), as cited in Chiotaki et al. [15], demonstrated how integrating emotional feedback into a language learning game improved engagement and retention.

Together, these techniques form multilayered adaptive architectures, where learner, domain, and pedagogical models interact to deliver personalized experiences. These systems anticipate needs, scaffold understanding, and maintain engagement—reflecting the MDA framework by linking mechanics (AI adaptations) with dynamics (learner responses) and aesthetics (sense of agency and Flow).

Despite their promise, these techniques require careful balance. Excessive complexity can obscure transparency, while oversimplified models may ignore meaningful variability. The recurring challenge is finding equilibrium between adaptivity power and interpretability—critical in education, where trust and explainability are paramount [5][8].

In summary, AI techniques in adaptive educational games range from rule-based logic to advanced machine learning and emotional AI. When aligned with pedagogical frameworks and ethical guidelines, these technologies enhance both cognitive outcomes and learner motivation.

4.2 Effectiveness of AI-Driven Adaptation

The effectiveness of AI-driven adaptation in educational games has been widely investigated, with consistent evidence showing positive impacts on learner performance, motivation, and engagement—particularly when adaptivity is grounded in real-time data and pedagogically sound design. Across the reviewed studies, adaptive systems consistently outperform static, one-size- fits-all approaches in diverse learning contexts [1][5][6][9][14].

One of the strongest supports comes from meta-analyses. Sailer and Homner [6] reported moderate positive effects on cognitive outcomes ($g = 0.49$) and motivational engagement ($g = 0.36$), particularly in systems combining personalization, social interaction, and narrative.

Wang et al. [14] found that personalized digital game-based learning significantly improved STEM outcomes compared to traditional instruction, with an average effect size of 0.667 across 33 studies These results suggest that adaptivity layered with engaging mechanics—progressive difficulty, adaptive hints, or narrative branching—enhances both retention and motivation.

AI-driven adaptation is particularly effective in regulating challenge levels to keep learners within their zone of proximal development. Reinforcement learning, Bayesian modeling, and neural networks support this regulation by analyzing performance patterns and adjusting tasks dynamically [5][9][11]. This aligns with Flow theory and the MDA framework: mechanics such as adaptive difficulty produce dynamics that sustain engagement, ultimately shaping positive learning aesthetics.

Beyond performance, adaptive systems support long-term knowledge retention and self- regulated learning. As Liao et al. [10] note, adaptive pacing and targeted feedback encourage deeper conceptual understanding and foster autonomy. Learners report greater enjoyment and persistence when adaptive scaffolds are present, reinforcing both cognitive and motivational benefits.

Emotional AI adds another layer by adapting to affective states. Tsai et al. [15] showed that a language game which responded to frustration or boredom improved engagement and reduced dropout, illustrating how affective adaptivity complements cognitive personalization [12][13].

Nevertheless, limitations are evident. Chiotaki et al. [15] observed that not all adaptive systems outperform non-adaptive ones, particularly when adaptation relies only on correctness. The depth of the learner model—whether it includes cognitive, affective, and behavioral variables— determines adaptation quality [13]. Furthermore, novelty effects can inflate early results, underscoring the need for longitudinal studies to confirm durable learning gains [12].

Another risk is that excessive adaptation may reduce opportunities for productive struggle or collaborative learning. Overly optimized pathways can limit exploration, isolate learners, and undermine social dynamics [8][11]. Effective systems must therefore balance personalization with openness, offering scaffolds without removing learner agency.

In conclusion, AI-driven adaptation has strong potential to improve learning outcomes and motivation when implemented with pedagogical intent and technical precision. Its effectiveness depends on the sophistication of adaptation logic, the design of the game environment, and the ethical framing of system operation. Addressing these considerations is critical as the field advances toward broader adoption.

4.3 Implementation Examples and Case Studies

Several notable case studies demonstrate how AI-driven adaptivity has been implemented in educational games across disciplines and learner demographics. These examples illustrate the diversity of approaches, technologies, and pedagogical goals that characterize the field.

The Math Garden project, discussed in Chiotaki et al. [15], is an adaptive arithmetic platform that uses an Elo-based difficulty adjustment algorithm combined with response time analysis to estimate proficiency and match learners with suitable tasks. By calibrating challenge in real time, the system supports Flow and sustains engagement. Widespread adoption in the Netherlands has shown significant gains in math fluency and motivation. However, its reliance on speed and correctness may limit inclusivity for learners with different cognitive or processing profiles.

In language learning, Tsai et al. [15] developed an emotion-aware game that integrates affective computing to detect emotional states through facial expressions. The system adapts task difficulty, pacing, and emotional tone, reducing frustration and increasing persistence, particularly among younger learners. This example illustrates how affective AI can strengthen the PENS dimensions of competence (through adaptive scaffolding) and relatedness (through empathetic feedback). A limitation is the reliance on facial recognition, which raises concerns of cultural bias and privacy.

CodeCombat, highlighted in Liao et al. [10], teaches programming in Python or JavaScript through a fantasy-themed environment. Its adaptive sequencing engine monitors learner progress and provides targeted scaffolds when misconceptions are detected. From an MDA perspective, mechanics (coding puzzles) generate dynamics (progressive mastery) and aesthetics (a sense of competence and autonomy). Studies report strong learner engagement, though effectiveness depends on the accuracy of system feedback and sustained narrative immersion.

De Gloria et al. [11] describe a vocational training game that employs PCG to generate scenarios tailored to learner choices. By adapting contexts in real time, the system provides authentic decision-making experiences that mimic workplace complexity. This approach illustrates the potential of PCG to align training with situated cognition. However, evaluation of long-term transfer beyond the game remains limited.

Finally, Pérez et al. [12] report serious games for cognitive skills assessment and mental health. These adaptive mini-games monitor attention and response times, adjusting task sequences accordingly. In neuropsychological rehabilitation, they not only support engagement but also generate diagnostic data useful for clinicians. While promising in education-adjacent contexts, questions remain regarding scalability and integration into mainstream curricula.

Across these cases, shared features include real-time data processing, feedback loops, and learner modeling, which underpin adaptivity. Yet differences in depth, AI techniques, and pedagogical alignment highlight both the flexibility and the evolving challenges of the field. Taken together, these examples underscore the importance of designing adaptive systems that balance effectiveness with transparency, inclusivity, and meaningful learning outcomes.

4.4 Challenges and Limitations

Despite the promise of AI-driven adaptive educational games, several technical, pedagogical, and ethical challenges persist that must be addressed for these systems to achieve wider adoption and sustained impact.

From a technical perspective, many systems face limitations in scalability and robustness. Adaptation engines that rely on handcrafted rules or small datasets struggle to generalize across diverse learners and subject areas [5][11]. Machine learning-based approaches require extensive training data, which may not be available or ethically collectable in K-12 contexts [8][13].

A critical challenge is the granularity of learner modeling. As Sachete et al. [13] note, many systems rely on narrow indicators such as correctness or time-on-task, neglecting richer cognitive and affective dimensions. This results in shallow personalization that fails to capture learner variability and reduces the pedagogical value of adaptation.

Transparency and explainability remain major obstacles. Complex systems based on neural networks or reinforcement learning often act as “black boxes,” leaving educators and learners unable to understand why adaptations occur [5][8]. This undermines trust and accountability, especially when AI-driven decisions significantly shape learning trajectories or assessments.

Pedagogical misalignment is also a concern. Some adaptive systems adjust difficulty mechanically without considering learner motivation, cognitive load, or collaborative dynamics. Chiotaki et al. [15] warn that over-adaptation can result in excessive scaffolding, depriving learners of productive struggle and limiting opportunities for peer interaction or metacognition [11][8]. From a Flow and MDA perspective, this disrupts the challenge–skill balance and diminishes the sense of agency central to engagement.

Ethical issues include privacy, algorithmic bias, and data ownership. As Schneider et al. [8] highlight, collecting sensitive data such as emotional states or biometric inputs raises serious risks if safeguards are absent. Bias in training data may reinforce inequities, leading to unequal outcomes for marginalized learners. Without fairness checks, adaptive systems risk becoming “personalization traps” that confine learners to limited pathways.

Finally, systemic issues of access and equity persist. High-quality adaptive games often depend on modern devices, reliable connectivity, and digital literacy, which are not equally available across all settings. Without intentional inclusive design, these innovations may exacerbate the digital divide [12][8].

In summary, while AI-driven adaptive educational games demonstrate effectiveness and innovation, their broader implementation requires addressing algorithmic transparency, pedagogical coherence, ethical safeguards, and equitable infrastructure. Responding to these challenges calls for not only technical refinement but also concrete mechanisms—such as explainable dashboards, informed consent protocols, and inclusivity checklists—that ensure personalized learning remains both effective and fair.

5 Ethical Considerations

As AI-driven adaptive educational games become increasingly integrated into learning environments, ethical concerns take center stage. These systems collect and process large volumes of sensitive learner data, often with minimal transparency about how this data is used or safeguarded. Furthermore, the algorithms that power personalization may encode or perpetuate existing biases if not properly designed and audited. Ethical design and implementation are therefore not optional features but essential components of responsible educational technology.

5.1 Privacy and Data Protection

AI-enhanced educational games rely on extensive data collection, including real-time performance metrics, behavioral indicators, emotional responses, and—in some cases— biometric signals. This data underpins learner modeling and adaptive feedback but also raises serious concerns about privacy, informed consent, and data security.

Schneider et al. [8] note that many educational systems fail to clearly communicate the scope of data collection to students, teachers, or guardians. Learners—especially minors—may not fully understand what information is tracked or how it is stored, shared, or monetized. In some platforms, default settings even allow continuous data capture without meaningful opportunities to opt out.

The risk of misuse or breach increases with the large volumes and granularity of data involved. Pérez et al. [12] point out that adaptive systems may track click patterns, eye movements, or emotional states, which—if compromised—could harm learner dignity and psychological safety. While regulations such as FERPA and GDPR provide partial protection, many AI-driven systems operate beyond traditional data boundaries and remain poorly regulated [8].

Cloud-based infrastructures and third-party analytics add further complexity, often leaving unclear who owns learner data and who bears responsibility for its ethical handling. As Sachete et al. [13] argue, transparent governance models are essential, specifying not only technical security protocols but also ethical boundaries for data use.

To address these concerns, privacy safeguards should move beyond abstract policy statements toward practical mechanisms:

- Transparent data dashboards for students, educators, and parents showing what is collected and why
- Explicit, age-appropriate consent flows, with opt-in by default for minors
- Privacy-by-design principles embedded in architecture, including data minimization and local storage options
- Regular third-party audits of data access, retention, and storage practices
- User rights tools allowing learners to review, export, or delete their data on demand These measures can help ensure that adaptive educational games respect learner autonomy,

align with legal frameworks, and foster trust in the responsible use of educational data.

5.2 Algorithmic Bias and Fairness

A growing body of research emphasizes that algorithmic bias in adaptive educational games is not merely a technical flaw but a socio-technical issue with pedagogical and ethical implications [8][12]. Algorithms can inadvertently reinforce inequalities when they rely on biased training data or optimization functions that prioritize efficiency over equity.

For example, Pérez et al. [12] discuss how adaptive games assessing cognitive performance may behave differently across demographic groups if not properly validated. A system designed for neurotypical learners may misinterpret the behaviors of neurodivergent students, producing inappropriate feedback or mismatched pacing. This raises concerns of construct validity— whether the model captures actual learner ability or merely encodes surface behaviors shaped by cultural, linguistic, or socioeconomic factors.

Bias also directly affects game experience. When adaptations misrepresent learner profiles, they can break Flow, undermine feelings of competence, or limit learner autonomy—contradicting the very motivational goals of adaptive design.

Schneider et al. [8] argue that fairness requires moving from reactive bias mitigation to proactive equity design. This involves defining fairness objectives at the system level (e.g., equal error rates across subgroups), auditing for disparate impact, and engaging diverse stakeholders in development. Embedding fairness-by-design principles helps avoid turning adaptive systems into “personalization traps” that confine learners to narrow algorithmic identities [12].

Practical mechanisms for fairness include:

- Regular bias audits comparing adaptation outcomes across demographic subgroups
- Fairness dashboards that visualize how difficulty or feedback varies by learner profile
- Developer checklists ensuring training data represent diverse populations
- Participatory co-design sessions with educators and students from underrepresented groups
- Transparent reporting of model validation processes, including subgroup performance metrics

Together, these strategies position fairness as an integral part of adaptive game design, ensuring that personalization enhances rather than restricts equity in learning.

5.3 Transparency and Explainability

Closely linked to fairness is the issue of transparency and explainability. Many adaptive educational games function as black boxes: learners and educators receive outputs—such as adjusted difficulty levels or feedback prompts—without insight into the reasoning behind them.

This opacity undermines user trust, reduces pedagogical oversight, and poses challenges for accountability in educational settings [5][8][11].

McLaren and Nguyen [9] highlight that even experienced educators may struggle to interpret or validate adaptive game behavior if the underlying AI logic is inaccessible or proprietary. For learners, unexplained shifts in feedback or task difficulty can appear arbitrary or punitive— especially for those already struggling—breaking Flow and weakening motivation.

From a pedagogical perspective, explainable AI (XAI) is essential for fostering metacognition and educator agency. Transparency allows learners to reflect on system feedback, correct misunderstandings, and better understand their progress. Instructors, in turn, can align interventions more effectively when they understand both the logic and the limitations of adaptive systems [8][9].

Effective practices for improving explainability include:

- Providing just-in-time rationales for system decisions (“this task was simplified to match your pace”)
- Offering learner- and teacher-facing dashboards that summarize adaptations, learner models, and system interventions
- Ensuring clear feedback mechanisms for both successful and unsuccessful actions
- Using interpretable models where possible (e.g., rule-based or decision-tree systems for formative feedback contexts)
- Incorporating visual indicators that make adaptation processes transparent without overwhelming the user

While complete transparency is not always feasible with complex models such as deep neural networks, a balance can be struck between algorithmic sophistication and human interpretability. Educational AI ethics guidelines increasingly stress the importance of this balance, positioning explainability not only as a technical safeguard but also as a pedagogical scaffold that supports learner autonomy and trust [8].

5.4 Inclusivity and Accessibility

As adaptive educational games become more prevalent, ensuring inclusivity and accessibility is essential to equitable educational transformation. These systems must accommodate diverse learner populations, including those with disabilities, multilingual or multicultural backgrounds, and varying levels of digital literacy.

Pérez et al. [12] emphasize that accessibility is not merely a technical requirement (e.g., screen reader compatibility) but a design philosophy that anticipates learner variability. Games that allow adjustable interface settings—such as font size, contrast, and audio—or offer multimodal feedback (visual, auditory, textual) can support learners with sensory impairments or neurodivergent processing styles.

Inclusivity also requires cultural and linguistic adaptation. Games developed in one context may fail to resonate with learners elsewhere if they rely on culture-specific metaphors or idioms. Adaptive systems must therefore be context-aware and ideally co-designed with local educators and communities to ensure cultural relevance [12][13].

Sachete et al. [13] caution that rigid adaptation frameworks may inadvertently exclude learners who deviate from expected patterns—for example, those who take longer to respond, explore non-linearly, or display anxiety-related inconsistencies. This misalignment can disrupt Flow or reduce feelings of competence and autonomy, both central to motivation as described in the PENS model.

To mitigate these risks, ethical adaptive games should embed universal design for learning (UDL) principles supported by concrete mechanisms:

- UDL checklists during design and evaluation to ensure multiple means of representation, expression, and engagement
- Low-bandwidth functionality and offline modes to extend access in resource-limited contexts
- Inclusive localization pipelines for language and cultural adaptation
- Playtesting with diverse learner groups, including those with disabilities or marginalized backgrounds
- Bias-checks integrated into development and evaluation cycles

Without intentional inclusivity, adaptive educational games risk reinforcing educational divides rather than bridging them. By embedding accessibility into both design philosophy and technical implementation, these systems can provide equitable learning opportunities that scale across contexts.

6 Future Directions and Recommendations

6.1 Emerging Technologies and Trends

As the field of AI-driven adaptive educational games matures, several emerging technologies and interdisciplinary trends are reshaping how these systems are designed, deployed, and scaled. These innovations expand the technical possibilities of adaptation while also redefining what constitutes effective, ethical, and inclusive educational experiences.

One major trend is the integration of large language models (LLMs) such as GPT-based systems into educational games. LLMs enable sophisticated natural language interactions between learners and AI agents, offering personalized dialogues, open-ended problem solving, and context-aware hints [12]. This marks a shift from pre-scripted interactions to conversational adaptivity, where learners engage in dynamic exchanges that reflect their reasoning paths. When paired with reinforcement learning or user modeling, LLMs can simulate human-like tutors at scale [12][9]. The challenge is balancing this conversational power with transparency and explainability so learners and educators understand why responses are generated.

Another frontier is the fusion of affective computing with multimodal data streams. Games increasingly incorporate facial expressions, voice tone, body posture, and even biometric signals (e.g., heart rate, skin conductance) to infer emotional and cognitive states. These inputs can adapt gameplay, feedback timing, and instructional strategies in emotionally intelligent ways [12][15]. While promising, this also raises heightened privacy concerns that require safeguards such as consent protocols and data minimization.

Closely related is the rise of embodied and XR (extended reality) environments, including VR and AR. In vocational or medical training, AI-enhanced XR games can provide immersive simulations that adapt to learner gestures, gaze, or stress responses [11][12]. These contexts highlight both the potential for deep engagement and the risk of cognitive overload if adaptive pacing is not carefully calibrated.

PCG, long used in entertainment, is evolving into an educational tool that tailors narratives, challenges, and assessment tasks to learner profiles. With advances in AI planning and storytelling algorithms, adaptive games can generate pedagogically aligned and contextually coherent content on demand [11][12], sustaining engagement through narrative novelty.

Collaborative and social adaptivity is also gaining momentum. Rather than focusing only on individuals, next-generation systems adapt group dynamics, facilitate peer learning, and orchestrate collaborative tasks in real time. AI can identify dominance patterns, disengagement, or conflict and intervene through prompts or role reassignment [7][9].

On the development side, low-code and no-code AI platforms are democratizing access. These tools allow educators and instructional designers to prototype and localize adaptive learning games without advanced programming skills

[12], accelerating innovation while raising questions about quality assurance.

Finally, learning analytics and ethical AI dashboards are becoming prominent tools for transparency. By visualizing adaptation decisions, learner profiles, and progress, dashboards support metacognition, trust-building, and pedagogical oversight [8][13]. Prototypes can include student-facing interfaces that explain why difficulty was adjusted, as well as teacher-facing dashboards that provide summaries of learner progress and fairness indicators.

In summary, the next generation of adaptive educational games will be shaped by synergies between LLMs, affective sensing, XR, PCG, and collaborative intelligence. These innovations promise richer, human-centered learning experiences but demand renewed attention to ethical design, participatory development, and long-term evaluation. Practical mechanisms such as ethical dashboards, consent flows, and adaptive pacing safeguards will be critical for ensuring that these technologies remain trustworthy and educationally effective.

6.2 Research Gaps and Opportunities

While AI-driven adaptive educational games have shown substantial promise, the field remains relatively young, with several gaps limiting the development of fully effective, equitable, and scalable systems. Addressing these gaps presents opportunities for advancing both theory and practice in educational technology.

One major gap lies in the lack of longitudinal and real-world classroom studies. Much of the current evidence comes from short-term trials with small, homogeneous samples [10][14]. As Pérez et al. [12] and Chiotaki et al. [15] note, little is known about how adaptive systems perform over extended periods, across diverse populations, and within complex ecosystems such as public schools or low-resource environments. Longitudinal studies are needed to assess the sustainability of learning gains, the evolution of learner behaviors, and the long-term equity impacts of adaptivity.

Another gap concerns the granularity of learner modeling. Many adaptive games still rely on simple performance metrics (e.g., correctness or response time) without accounting for prior knowledge, motivation, or cognitive processes [5][13]. Future research should explore multimodal models that integrate affective signals, eye-tracking, and behavioral data. At the same time, this raises questions about data validity, noise filtering, and interpretability [8][12].

The field also lacks a standardized framework for evaluating adaptivity. While some studies report improvements in engagement or performance, few provide consistent benchmarks for what constitutes effective adaptation [6][14]. Building on frameworks such as MDA, Flow, PENS, and the Game Experience Questionnaire (GEQ), future research should develop shared taxonomies linking types of adaptivity (e.g., pacing, feedback, content sequencing) to measurable outcomes. Inclusivity remains another challenge. Most systems are developed and tested on narrow user bases, limiting generalizability and reinforcing systemic bias. There is a need for participatory research with underrepresented groups—including learners with disabilities, multilingual learners, and marginalized communities—to ensure equitable design [8][12][13].

Co-adaptive systems remain underexplored. Current models treat learners largely as data sources rather than active agents. Research should investigate learner-controlled adaptation, where students can adjust difficulty levels, select goals, or reflect on system feedback via explainable dashboards. Such approaches could enhance metacognition, agency, and trust [5][8]. On the development side, more work is needed on low-resource adaptive design. This includes mobile-first environments, offline functionality, and bandwidth-efficient architectures, particularly relevant for underserved regions [12][13]. Addressing these needs could expand equitable access to adaptive learning worldwide.

Finally, interdisciplinary collaboration remains a pressing priority. Many projects are developed in disciplinary silos—AI experts working without educators, or game designers without ethicists. Building collaborative ecosystems that integrate technical, pedagogical, and ethical expertise will be essential for producing sustainable and impactful innovations[9][12].

6.3 Practical Implementation Recommendations

Translating research on AI-driven adaptive educational games into effective practice requires implementation guidelines that balance pedagogical goals, technological feasibility, and ethical responsibility. Drawing on the reviewed literature, several actionable recommendations emerge for designers, educators, developers, and policymakers.

1. Start with Pedagogical Objectives, Not Technology

   Adaptive games should be designed around clear learning outcomes, with adaptation used strategically—whether through pacing, feedback, or differentiated content [2][4][5]. Features must align with cognitive and motivational theories such as constructivism, self-determination theory, and flow to ensure personalization supports deep learning [7][9].

2. Use Transparent and Interpretable Adaptation Mechanisms

   Whenever possible, pair opaque models (e.g., neural networks) with explainable interfaces. Dashboards for teachers and just-in-time rationales for students help contextualize system decisions, fostering trust and metacognition [5][8].

3. Adopt Inclusive and Accessible Design Principles

   Systems should be usable across diverse populations, with multimodal outputs, adjustable settings, culturally relevant narratives, and offline functionality. Applying Universal UDL principles can help reduce systemic barriers [12][13].

4. Incorporate Ethical Data Governance Practices

   Follow privacy-by-design and minimization principles: collect only necessary data, communicate policies clearly, and provide tools for learners to view or delete their data. Special care is needed when working with minors [8].
5. Plan for Iterative Evaluation and Improvement

   Continuous evaluation using both quantitative and qualitative data is essential. Feedback loops from teachers, learners, and administrators should inform iterative refinement [6][14].
6. Design for Co-Adaptation and Learner Agency

   Allow learners to influence adaptation by adjusting difficulty, selecting goals, or using reflective prompts. These features support agency, metacognition, and engagement while reducing dependence on opaque algorithms [9].
7. Foster Interdisciplinary Collaboration

   Development should involve educators, designers, AI researchers, psychologists, ethicists, and learners, using participatory methods to ensure pedagogical and cultural alignment [9][12].
8. Ensure Scalability and Sustainability

   Optimize for mobile-first use, minimize bandwidth requirements, and use modular architectures for local customization. Long-term adoption requires institutional support, educator training, and technical maintenance.

   To support responsible practice, developers and educators can apply the following checklist during design and deployment:

- Have consent flows been designed for all users, with special provisions for minors?
- Are algorithms tested for fairness across demographic subgroups?
- Does the system provide transparent explanations for adaptive decisions?
- Are accessibility and UDL principles embedded in design?
- Can users review, export, or delete their data?
- Has the system been evaluated with diverse learner groups, including underrepresented populations?

In summary, effective implementation of AI-driven adaptive educational games requires thoughtful integration of pedagogy, ethics, technology, and human-centered design. By following these guidelines and applying concrete tools such as ethical checklists and dashboards, adaptive games can deliver personalized learning responsibly, inclusively, and sustainably.

6.4 Policy and Governance for Education Systems

The implementation of AI-driven adaptive educational games does not occur in a vacuum; it must be supported by coherent policy frameworks and educational infrastructures that ensure alignment with curricular goals, ethical standards, and equity mandates. Without clear guidance at the institutional and governmental levels, the risks of fragmentation, inequity, and misuse increase substantially.

1. Align Adaptive Systems with Curriculum Standards

   For AI-enhanced games to be meaningfully integrated into classrooms, they must be aligned with national or regional curricular standards and learning competencies. Many adaptive games are developed independently of formal education systems, leading to gaps between what the game teaches and what the curriculum requires. Policymakers should promote frameworks that encourage developers to map game content to standardized educational objectives, assessment rubrics, and grade-level expectations [11][14].

   Additionally, educational authorities can support the adoption of adaptive systems by providing certification pathways that validate a game's pedagogical integrity, content accuracy, and alignment with learning goals. These frameworks can help educators select high-quality tools that are both effective and contextually appropriate [9].
2. Establish Ethical AI Governance Guidelines

   National and institutional education policies must also address the ethical use of AI in learning contexts. As Schneider et al. [8] and Pérez et al. [12] argue, existing data protection regulations (e.g., FERPA, GDPR) may not sufficiently cover the unique challenges posed by adaptive learning systems, such as real-time behavioral tracking, opaque decision-making, and predictive modeling.

   Educational frameworks should therefore include specific AI ethics guidelines, covering:

- Data ownership and learner rights
- Fairness and algorithmic transparency
- Explainability of adaptive decisions
- Age-appropriate consent mechanisms
- Ongoing impact assessments

   These policies must be enforceable and co-developed with input from students, parents, educators, researchers, and technologists.
3. Promote Digital Equity and Infrastructure Support

   For adaptive educational games to reach all learners, governments and school systems must address digital infrastructure disparities. Many of the most effective AI-enhanced games rely on reliable internet, modern devices, and real-time data streaming-resources that are unequally distributed across schools and regions. Without targeted investment in devices, connectivity, and teacher training, adaptive innovations risk deepening the digital divide [12][13].

Policy initiatives should promote equity-by-design, subsidizing access to high-quality adaptive tools for underserved communities and supporting localized adaptation in linguistically and culturally diverse contexts. Public-private partnerships may also be leveraged to scale deployment while ensuring public oversight of data and learning outcomes.

4. Support Educator Professional Development

Teachers play a central role in the effective implementation of adaptive systems, yet many receive little to no training on how these tools work or how to integrate them meaningfully into their pedagogy [9][10]. Educational policies must include sustained, scalable professional development programs that equip educators with:

- Technical literacy to interpret system outputs
- Pedagogical strategies for blended adaptive instruction
- Ethical awareness about student data and personalization limits

Teacher feedback should also be built into procurement, design, and iteration cycles, reinforcing educators' role as co-designers and evaluators of adaptive tools [8][12].

5. Encourage Cross-Sector Collaboration and Research Funding

Finally, policy frameworks should incentivize interdisciplinary research, cross-sector collaboration, and open-access dissemination of findings. Ministries of education, research councils, and innovation funds can support partnerships among universities, startups, and public institutions to pilot adaptive games, evaluate outcomes, and share scalable models for others to build upon [9][12].

Open datasets, design toolkits, and policy briefs can help democratize access to innovation and promote ethical, evidence-based scaling of adaptive educational systems across national and global contexts.

In conclusion, realizing the full potential of AI-driven adaptive educational games requires supportive educational policies and governance structures that ensure ethical alignment, curricular integration, and equitable access. Forward-thinking frameworks must position adaptation not as a standalone technology, but as a deeply embedded component of the evolving educational ecosystem.

7 Conclusion

The integration of artificial intelligence into educational games marks a transformative step toward more personalized, engaging, and effective learning experiences. AI-driven adaptive systems have the potential to tailor instruction, feedback, and content dynamically, accommodating diverse needs, learning styles, and emotional states. Embedded within game-based environments, these systems leverage the motivational and immersive qualities of play to promote sustained engagement.

This paper synthesized findings from contemporary research through an integrative literature review, examining foundational theories, practical implementation cases, and the effectiveness of adaptive mechanisms. Case studies such as Math Garden, CodeCombat, and emotion-aware language games demonstrated how adaptive techniques are applied in practice, highlighting both successes and limitations. The analysis also integrated game design frameworks—including MDA, Flow, and PENS—to connect adaptation to core principles of engagement and motivation. Significant ethical concerns were discussed, particularly around privacy, bias, transparency, and inclusivity, alongside technical and infrastructural challenges that shape implementation.

Emerging technologies such as large language models, affective computing, extended reality, and procedural content generation are opening new possibilities for adaptivity. Yet, these innovations must be grounded in pedagogical goals, balanced with learner agency, and supported by transparent governance. Practical contributions of this review include recommendations for dashboards that explain adaptation, ethical implementation checklists, inclusive design principles, and policy frameworks for curricular alignment and equity.

Ultimately, the future of AI-enhanced adaptive educational games depends not only on technological innovation but also on interdisciplinary collaboration, longitudinal research, and ethically grounded practice. When thoughtfully implemented, these systems hold the promise to transform education by making learning more responsive, inclusive, and engaging for all learners.

References

1. El-Sabagh, H.A.: Adaptive e-learning environment based on learning styles and its impact on development students' engagement. Int. J. Educ. Technol. High. Educ. 18(53), (2021).
2. Protopsaltis, A., Pannese, L., Pappa, D., Hetzner, S.: Serious games and formal and informal learning. E-Learning Papers, (2011).
3. Erhel, S., Jamet, S.: Digital game-based learning: Impact of instructions and age on learning effectiveness. Comput. Hum. Behav. 38, 239–247 (2014).
4. Prensky, M.: Digital Game-Based Learning. McGraw-Hill, New York (2001).
5. Gligorea, I., Cioca, M., Oancea, R., Gorski, A.-T., Gorski, H., Tudorache, P.: Adaptive learning using artificial intelligence in e-learning: A literature review. Educ. Sci. 13(1), 25 (2023).
6. Sailer, M., Homner, L.: The gamification of learning: A meta-analysis. Educ. Psychol. Rev. 32(1), 77–112 (2020).
7. Admiraal, W., Huizenga, J., Akkerman, S., Ten Dam, G.: The concept of flow in collaborative game-based learning. Comput. Hum. Behav. 27(3), 1185–1194 (2011).
8. Schneider, D., Dowell, B., Thompson, S.: Ethical considerations in AI education: A framework for responsible development and implementation. In: Uskov, V., Howlett, R.J., Jain, L.C. (eds.) Creative AI Tools and Ethical Implications in Teaching and Learning. IGI Global, Hershey (2023).
9. McLaren, B.M., Nguyen, H.: Learning with AIED and digital learning games. In: Nkambou, R., Bourdeau, J., Mizoguchi, R. (eds.) AIED Handbook. Springer, Cham (in press, 2023).
10. Liao, S.N., Lin, M.H., Sun, C.T., Hsu, Y.S.: Game-based learning in computer science education: A review of the literature. Front. Comput. Sci. 2, 1–13 (2020).
11. De Gloria, A., Bellotti, F., Berta, R.: Serious games for education and training. Int. J. Serious Games 1(1), 1–10 (2014).
12. Pérez, J., Castro, M., López, G.: Serious games and AI: Challenges and opportunities for computational social science. IEEE Access 11, 62051–62061 (2023). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3286695
13. Sachete, J., Fonseca, D., Redondo, E.: Adaptive indicators in virtual learning environments: A systematic review. Educ. Sci. 12(4), 231 (2022).
14. Wang, A.I., Øfsdahl, T., Mørch-Storstein, O.: Effects of digital game-based STEM education on student learning: A meta-analysis. Educ. Inf. Technol. 27, 3349–3378 (2022).
15. Chiotaki, M., Charitakis, C., Krouska, A., Troussas, C.: A systematic review of serious games for children. Educ. Sci. 13(7), 710 (2023).

Michel Lopez-Franco is a researcher at CUCEI, University of Guadalajara, holding a Ph.D. in Electrical Engineering from CINVESTAV. He specializes in neural control for mobile robots, contributing to international publications. He also leads robotics projects and holds SNII Level 1 recognition.

Dariana Gomez-Alvarez is a Mechatronics Engineer and Master's candidate in Robotics and Artificial Intelligence at the University of Guadalajara. With experience in smart systems, AI algorithms, and neural networks, she specializes in advanced automation and the identification of nonlinear systems.

David Bonilla Carranza, Ph.D. in Electronic and Computer Sciences, is a professor at CUCEI, University of Guadalajara. His research includes video game engineering, graphical interfaces, and IoT. He has authored various publications and leads the *Inventores Lab*, fostering maker communities and innovation.

Carlos Lopez-Franco earned his Ph.D. from CINVESTAV in 2007 and is a Level 2 member of Mexico's National Research System (SNII). A Senior IEEE Member, he belongs to the Consolidated Intelligent Systems Academic Body. His research focuses on computer vision and robotics, particularly in search and rescue robots.

Lilibet Lopez-Franco is a researcher specializing in hybrid learning and active pedagogies. She has published several books on topics like data science, problem-based learning, and Raspberry Pi. Her work focuses on improving educational strategies and applying technology to real-world problems.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

LUDICON
Recibido 23 Nov. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*
Aceptado 24 Nov. 2025

Rediseño de Emotion4Us: un videojuego para apoyar la conciencia emocional de las personas con discapacidad intelectual.

Redesigning Emotion4Us: A video game for supporting emotional awareness of people with intellectual disabilities

Andrea Rivas Gómez[1]
Antonio Ramos Gonzalez[1]
Marisela Hernández-Lara[2]
Brayan Ivan Perez Ventura[1]
Ana I. Martínez-García[2]
Karina Caro[1]

[1] Autonomous University of Baja California (UABC), Ensenada, BC, México.
rivas.andrea@uabc.edu.mx,gonzalez372576@uabc.edu.mx, brayan.perez56@uabc.edu.mx, karina.caro@uabc.edu.mx
[2] CICESE, Research Center. mhernandez@cicese.edu.mx, martinea@cicese.mx

Resumen. La conciencia emocional es fundamental para el desarrollo socioemocional, ya que facilita la autorregulación, mejora las habilidades sociales y promueve el bienestar general. Sin embargo, para las personas con discapacidad intelectual, comprender y gestionar las emociones puede resultar difícil. Estudios muestran que los videojuegos serios pueden ayudar a desarrollar estas habilidades, principalmente al enseñar nuevos conceptos mientras el entretenimiento es un objetivo secundario, a menudo mediante estrategias de gamificación. Aunque algunas investigaciones destacan sus beneficios, estos videojuegos no están diseñados explícitamente para promover la conciencia emocional. Emotion4Us es un videojuego serio diseñado para fomentar la conciencia emocional en personas con discapacidad intelectual, utilizando estímulos positivos para reforzar comportamientos deseados con base en la teoría de la autodeterminación y el marco MDA (Mecánicas, Dinámicas y Estéticas). Este artículo aborda el proceso de rediseño y presenta los resultados de dos sesiones de validación con psicoterapeutas y docentes de educación especial, centrándose en el potencial del videojuego y las áreas de mejora. Concluimos con una discusión sobre el trabajo futuro y una reflexión sobre los requisitos para una implementación exitosa del videojuego.

Palabras Clave: Conciencia emocional, discapacidad intelectual, juegos serios.

Abstract. Emotional awareness is crucial for social-emotional growth, as it facilitates self-regulation, enhances social skills, and promotes over- all well-being. However, for people with intellectual disabilities, under- standing and managing emotions can be difficult. Studies show that se- rious video games can help develop these skills, mainly by teaching new concepts while entertainment is a secondary goal, often using gamifica- tion strategies. Although some research highlights their benefits, these games are not explicitly designed to promote emotional awareness. *Emo- tion4Us* is a serious video game designed to promote emotional aware- ness in individuals with intellectual disabilities, utilizing positive stimuli to reinforce desired behaviors based on self-determination theory and the MDA (Mechanics, Dynamics, and Aesthetics) framework. This paper dis- cusses the redesign and shares results from two validation sessions with psychotherapists and special education teachers, focusing on the game's potential and areas for improvement. We conclude with a discussion of future work and a reflection on the requirements for a successful imple- mentation of the video game.

Keywords: Emotional awareness, Intellectual disabilities, Serious games.

1 Introduction

Emotional awareness—defined as the ability to identify, understand, and de- scribe one's own emotions and those of others—is a vital skill in social-emotional development, promoting emotional self-regulation, social adaptation, and over- all well-being. However, for individuals with intellectual disabilities, recognizing, expressing, and managing emotions can present significant challenges. These dif- ficulties can impact their communication, learning, and ability to participate in everyday social situations fully [1].

Research indicates that serious video games can help develop various skills in individuals with intellectual disabilities [2]. The primary goal of these games is to support the development of specific skills, such as improving learning or

understanding new concepts, with entertainment as a secondary goal [3]. Ad- ditionally, these types of games typically use gamification [18], which can be defined as the strategic application of game-design elements and principles to non-game settings, such as education, to boost user engagement, motivation, and behavior.

Some studies show how these games aid skill development in these popula- tions [2, 4]. However, they have not been designed to foster emotional awareness. Similarly, technology aims to support the recognition and identification of emo- tions. Still, most efforts focus on other groups, such as people with autism [5] or Attention Deficit / Hyperactivity Disorder (ADHD) [12]. Further research is needed to investigate how we can design serious games that support the emo- tional awareness of individuals with intellectual disabilities.

Emotion4Us is a serious video game designed as a support tool to promote emotional awareness in people with intellectual disabilities. It utilizes reinforcers, such as positive stimuli, to increase the likelihood of desired behaviors associ- ated with emotional learning. These mechanisms are based on the principles of positive reinforcement, which have been proven effective in behavioral change, especially in educational and family settings [6]. This study presents the re- design of *Emotion4Us* and discusses the results of two validation sessions with psychotherapists and special education teachers of individuals with intellectual disabilities.

2 Related work

Several serious video games support the development of emotional awareness in diverse populations. This includes neurotypical individuals as well as those with developmental disorders. These video games are beneficial in enhancing emotional awareness and other cognitive skills [7, 5]. For example, EmoTEA
[5] is a serious game designed to teach children with autism how to identify and express emotions, incorporating tangible user interfaces and emotion recognition technology that uses facial expressions. An evaluation of EmoTEA with three children with autism and two psychotherapists showed that the system is a helpful tool for teaching emotion-related concepts.

Recent research has shown promising results for multimodal serious games in enhancing emotional skills. Löytömäki et al. [12] conducted a study using the Emotion Detectives (ED) game with children who have autism spectrum disorder, ADHD, and developmental language disorder. The intervention group (n = 30) showed significant improvements in four of six emotion discrimina- tion tasks after two months, with these benefits maintained at the one-month follow-up. Similarly, Kirst et al. [13] evaluated Zirkus Empathico (ZE), a parent- assisted serious game, with 82 children on the autism spectrum aged 5-10. While a six-week program did not produce lasting changes in empathy and emotion recognition, ZE improved emotional awareness, emotion regulation, and reduced autism symptoms in the medium term. The study highlights the importance of addressing one's own emotion processing alongside recognizing others' emotions for comprehensive intervention.

2.1 The Emotion4Us Videogame

Emotion4Us is a video game designed to support the emotional awareness of people with intellectual disabilities. It was initially designed for people with Down syndrome[3], but we decided to rename it to target other disorders related to intellectual disability, beyond Down syndrome. The following are the main features of *Emotion4Us*:

- **Customization:** Therapists can tailor the game to meet the individual needs and preferences of the player, making it easier for them to start. Per- sonalized features include names, reinforcements, emotions, and the number of trials.

- **Visual and auditory stimuli:** The video game interface features visual and auditory stimuli, such as bright colors, music, and videos or anima- tions. To facilitate skill generalization, images depicting different emotions are presented in two formats: animated characters and real people.
- **Reinforcement:** At the end of each activity, the player earns digital stars as a reward for their progress (partial reinforcement). After completing all ac- tivities, the player receives a digital trophy (final reinforcement). Therapists can customize the reinforcements based on the player's preferences.
- **Emotions:** The emotions available in *Emotion4Us* are happy, sad, angry, bored, tired, scared, in addition to the feeling of pain.
- **Interaction model:** The video game incorporates tactile interaction, a nat- ural method for people with intellectual disabilities to engage [8].

Each available emotion in *Emotion4Us* is practiced through the following four activities:

- **Activity 1. Bring the image into the frame.** The player must drag the image that matches the emotion displayed on the screen.
- **Activity 2. Show an emotion situation.** The video game shows a sce- nario in which an emotion is expressed, provides a brief explanation of the scene, and asks the player to choose from three options indicating which emotion is shown.
- **Activity 3. Imitate emotion.** The player must mimic the emotion that is being displayed. The device's camera is turned on, allowing the player to see themselves on the screen and try to replicate the emotion shown on the right side.
- **Activity 4. Create emotion.** The player demonstrates the chosen emotion by adjusting the eyes, mouth, and eyebrows on the screen. They need to drag these elements to a designated area to form the selected emotion.

[3] Originally named as Emotion4Down.

The features of Emotion4Us are based on self-determination theory [14], which states that humans have three innate psychological needs: competence, autonomy, and relatedness. On the one hand, reward and personalization me- chanics fulfill the basic needs of competence by incorporating challenges, ac- tivities, and positive feedback, and autonomy by enabling users to customize elements and activities. The MDA framework (Mechanics, Dynamics, and Aes- thetics) [19] explains how game mechanics foster improvement and progression, which is expressed through pleasure, challenges, and expression. In Emotion4US, progression mechanics include level advancement and rewards. Digital stars and trophies act as direct rewards, while feedback on activity accuracy reinforces engagement.
The *Emotion4Us* video game was designed using a user-centered approach
and has been previously evaluated (as Emotion4Down) with two individuals with Down syndrome [17], indicating its potential to support emotional awareness in this population. The evaluation also highlighted the need to update the user in- terface (UI) of the video game in accordance with the latest design standards and to enhance the user experience (UX) for individuals with intellectual disabilities. In this paper, we explain the redesign process of *Emotion4Us*.

3 Methods

The first step in redesigning *Emotion4Us* was to analyze its current video game design using Nielsen's usability heuristics [9]. Next, we reviewed the design guide- lines for UX and UI available in the literature. Then, we redesigned *Emotion4Us* in accordance with the UX/UI guidelines. Finally, we validated the new design with experts in intellectual disabilities. Next, we describe each stage of the design process.

1. **Analysis of the *Emotion4Us* design and heuristic evaluation:** At this stage, we analyze the current design of the video game's interface to identify usability issues and guide its redesign to become more user-friendly. We used Nielsen's ten usability heuristics [9] to identify usability problems, which are ten general principles or broad usability rules for interaction design. The process for conducting the heuristics evaluation was as follows: Two mem- bers of the research team reviewed the video game, guided by its functional requirements. Each member received a checklist detailing each heuristic for evaluation. After individual assessments, the team held a meeting to discuss the results, reach a consensus that combined all findings, and outline the main suggested changes to the app.

2. **Review of literature design guidelines:** We then conducted a literature review to identify the existing interface design guidelines that could serve as references for the new interface design proposal.
3. **Redesign proposal:** After reviewing the current design of the video game and the design guidelines, we created a design proposal for the *Emotion4Us* interface. This proposal was turned into a medium-fidelity prototype using the Figma design tool.
4. **Validation sessions with experts:** To validate the redesign proposal, two validation sessions were conducted with a psychotherapist and a special ed- ucation teacher.

4 Analysis of the Emotion4Us design, heuristic evaluation and design guidelines

Table 1 presents the main results of the heuristic evaluation, highlighting the main changes suggested to improve the design of the video game.

Table 1. Results of applying Nielsen's Heuristics to the actual version of *Emotion4Us*.

Nielsen's Heuristics	Yes	Partly	No	**Suggested changes**
H1. Visibility of System Status		X		Redesign the menus to display all the options clearly.
H2. Match between the System and the Real World	X			Provide more details about each activity and emotion.
H3. User Control and Freedom		X		Add the 'Go Back' and 'Exit' options.
H4. Consistency and Standards		X		Check spelling and grammar, fix inconsistencies between fonts and sizes.
H5. Error Prevention H9. Help Users Recognize, Diagnose, and Recover from Errors		X		Improve error messages and alerts when the user fails to select the correct option.
H6. Recognition rather than Recall	X			Review heading labels for consistency and visibility.
H7. Flexibility and Efficiency of Use		X		Enhance customization menus to simplify this process for therapists.
H8. Aesthetic and Minimalist Design		X		Evaluate the color palette.
H10. Help and Documentation		X		Add help buttons.

Based on the heuristic evaluation, several areas for improvement were iden- tified. The most common issues included:

- Lack of visibility in system selections, making it unclear which emotion was chosen.
- The user controls lacked options to return to the main screen at any time.
- Interface inconsistencies with visual elements that did not follow principles of consistency or minimalism, such as margins, styles, typography, and ani- mations.
- Limited feedback for incorrect actions.
- No user support or help guides included in the instructions.

These findings played a crucial role in redefining the navigation structure, language used, and visual elements of the prototype.

We also reviewed the literature on accessible technology, inclusive design, and emotional learning tools for people with intellectual disabilities to identify design guidelines for this population. This review highlighted key design elements, including visual clarity, simple navigation, and immediate feedback. It also helped outline design considerations based on the work of [10, 11], including:

- Increase the contrast between text and background to improve readability.
- Avoid overusing bright or saturated colors, as they can confuse.
- Make the clickable areas larger.
- Limit the on-screen options to reduce cognitive load.
- Choose simple and clear fonts. Fonts with excessive detail can be difficult to read, especially for individuals with cognitive disabilities.

5 Redesign Proposal

Based on the findings from the heuristic evaluation and a review of design guide- lines from the literature, the *Emotion4Us* video game was redesigned. This new version incorporated accessibility guidelines focused on visual clarity, positive reinforcement, and the needs of the target audience. Priority was given to us- ing high-contrast visual elements, easily recognizable icons, short phrases, and consistent structures.

Fig. 1. Comparison between the original design and the redesign proposal of Emo- tion4Us, including the start screen, user preferences, emotion selection, and activity customization.

Figure 1 shows a comparison between the original design and the redesign proposal of *Emotion4Us*, including the start screen, user preferences, emotion selection, and activity customization. The main changes in the redesign include choosing a color palette and a specific font type, ensuring consistency in font styles and sizes. The new color palette maintains the original logo colors but adds a range of vibrant shades with slightly warmer tones that prevent oversaturation. Verdana Pro Condensed was chosen because Verdana is designed to be easy to read on screens, with proper letter spacing and a clear design. It is recommended for individuals with visual impairments and other disabilities [11]. Other updates include the navigation layout and the organization of elements.

Figure 2 illustrates the comparison between the original design and the re- design proposal for the four activities available in *Emotion4Us*. The main up- dates include a consistent design for each activity, maintaining text font types and sizes, the color palette, element organization, and navigability.

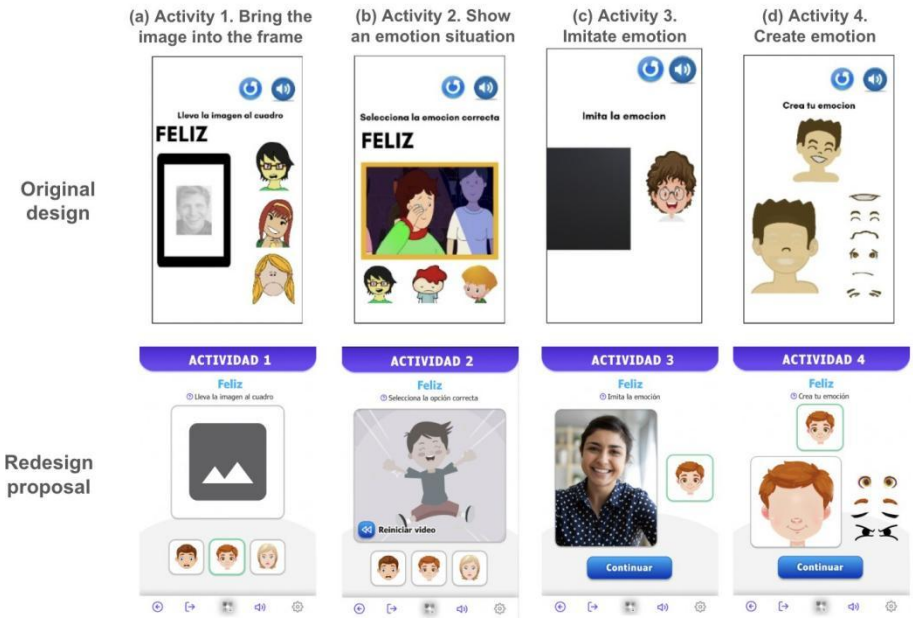


Fig. 2. Comparison of the four activities in the Emotion4Us video game between the original design and the redesign proposal.

In summary, the redesign proposal features a clear and simple interface with linear navigation and icons, adds user support through help features in each instruction, includes a navigation bar to facilitate user interaction, and incorpo- rates prompts and alerts for each status change and confirmation.

6 Design validation

We validated the redesign proposal with experts who work with individuals with intellectual disabilities. Next, we outline the methods and results of the design validation sessions.

6.1 Methods

We conducted two validation sessions, one with a psychotherapist experienced in working with individuals with various developmental disorders, including in- tellectual disabilities, and another with a special education teacher who is also the mother of someone with an intellectual disability (Table 2).

Table 2. Details of participants of the design validation sessions.

Session	ID	Occupation	Genre	Age of Experience	Duration
1	P1	Psychotherapist	F	4 years	02:01:37 hrs
2	P2	Special education teacher and mother of a daughter with an intellectual disability	F	20 years	01:06:31 hrs

The procedure for the design validation sessions was as follows. First, we out- lined the project's goals. Then, guided by the research team, each participant interacted with the medium-fidelity Figma prototype of *Emotion4Us*. Next, we discussed each feature of the video game using the think-aloud method. At the end of each session, we thanked the participants for helping us validate the video game design. All sessions were recorded on video, and the collected observations and comments were transcribed and analyzed qualitatively, allowing us to iden- tify areas for improvement.

6.2 Results

The validation sessions showed that the redesign proposal could help individuals with intellectual disabilities become more emotionally aware. Next, we list the main results of the validation sessions.

- **Overall design.** Both participants agreed that the new design was clean and consistent. They liked the color palette, the design line, font type, element organization, and navigation. Some of the participants' comments included:

  "The colors of the interface are very nice; I don't find them overly saturated." P1.
  "The instructions are easier to follow and the screens are not over- loaded with information" P2.

- **Language and instructions.** Both participants suggested replacing the word "patient" with "user" or "student," noting that "patient" might be seen as a medical term with negative connotations for people with intel- lectual disabilities, as P1 commented: *"Don't refer to certain users as pa- tients; change it to another term, such as person or user."* Additionally, P1 recommended changing the word "bring" to "move" in activity 1 for clar- ity. Conversely, P2 proposed changing the menu label "manage patient" to "student information" or "user information." Finally, P2 suggested changing error messages from "try again" to "You did well, but we can do better" to encourage and motivate users to attempt the activity again.
- **Customization and difficulty levels.** Both participants expressed a desire to specify the duration of the situation video in activity 2. They also noted that the video should have the option to pause or change if the situation is unclear. Both suggested that it would be helpful to include the pictures users take in Activity 3 across the other three activities. Lastly, participants indicated that adding difficulty levels to each activity could help address users' specific needs. These levels should reflect the users' level of intellectual disability.
- **Navigation and menus.** Both participants recommended that the video game include an option to skip an activity if desired. P2 proposed adding a "mini guide" to the main menu or at the start, so that the person using the video game understands what each activity involves before configuring it, expressing: *"A guide or demo is needed to understand what the activities consist of before configuring them."*

7 Conclusions and Future work

This paper discusses the redesign of *Emotion4Us*, a serious video game designed to support emotional awareness in individuals with intellectual disabilities, and shares the results from two expert validation sessions. Findings indicate that the current design has great potential, but also reveal areas for improvement to make it accessible to diverse cognitive needs.

Future work will refine the video game's interface and navigation better to meet the needs of individuals with intellectual disabilities. We plan to evaluate usability with at least ten participants using the System Usability Scale (SUS), game experience with the Game Experience Questionnaire (GEQ), and emo- tional awareness through pre- and post-tests. These studies will offer insights into how the game fosters emotional awareness and interaction. Based on these results, we will develop a high-fidelity prototype of Emotion4Us in engines like Kotlin, featuring adaptive difficulty, tutorials, and customization to suit diverse abilities and preferences. We aim to create a transmedia narrative that utilizes multimedia resources, such as videos, to reinforce emotional learning beyond the game. All phases will follow strict ethical protocols, including adapted consent forms, data anonymization, and participation options that do not require video recordings to ensure users' privacy, autonomy, and comfort.

In conclusion, *Emotion4Us* represents a promising step forward in using dig- ital technologies for emotional support among populations with special needs. However, the success of the video game will depend on the continuous dedication to evidence-based improvements and collaboration among developers, therapists, family members, and users themselves.

References

1. Emerson, E., & Hatton, C. (2007). Mental health of children and adolescents with intellectual disabilities in Britain. The British Journal Of Psychiatry, 191(6), 493-499. https://doi.org/10.1192/bjp.bp.107.038729
2. Terras, M. M., Boyle, E. A., Ramsay, J., & Jarrett, D. (2018). The opportunities and challenges of serious games for people with an intellectual disability. British Journal of Educational Technology, 49(4), 690-700.
3. Dörner, R., Göbel, S., Effelsberg, W., & Wiemeyer, J. (2016). Serious games. Springer: Cham.
4. Hernández-Lara, M., Caro, K., & Martínez-García, A. I. (2024). Supporting the cognitive development of individuals with intellectual disabilities through a video game for emotional regulation. ReCIBE, Revista electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica, 13(3), E7-11.
5. Garcia-Garcia, J. M., Penichet, V. M., Lozano, M. D., & Fernando, A. (2022). Using emotion recognition technologies to teach children with autism spectrum disorder how to identify and express emotions. Universal Access in the Information Society, 21(4), 809-825.
6. Rasmussen, Benjamin D. (2024) "Parental Strategies for Modifying Behavior: The Positives of Positive Reinforcement," Intuition: The BYU Undergraduate Journal of Psychology: Vol. 16: Iss. 1, Article 7.
7. Tsikinas, S. Xinogalos, S. (2018) “Studying the effects of computer serious games on people with intellectual disabilities or autism spectrum disorder: A systematic literature review”. Thessaloniki, Greece pp. 61–73 CA: University of Macedonia.
8. Kumin,L., Lazar, J., Feng, J.H., Wentz, B. and Ekedebe, N. (2012). A usability evaluation of workplace-related tasks on a multi-touch tablet computer by adults with Down syndrome. J. Usability Studies 7, 4 (August 2012), 118–142.
9. Taft, T., Staes, C., Slager, S., & Weir, C. (2016). Adapting Nielsen’s Design Heuris- tics to Dual Processing for Clinical Decision Support. AMIA Annual Symposium Proceedings, 2016, 1179–1188.
10. Kravets, A., Shcherbakov, M., Kultsova, M., Shabalina, O. (2015). Design of Mobile Applications for People with Intellectual Disabilities. Creativity in Intelligent Tech- nologies and Data Science. Communications in Computer and Information Science, vol 535. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23766-4_65
11. Pailiacho-Mena, V. M., & Garcés-Freire, E. X. (2023). Tipografías que facilitan la accesibilidad. In Actas del Congreso de Investigación, Desarrollo e Innovación (pp. 91-95). https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2023-15
12. Löytömäki, J., Ohtonen, P., & Huttunen, K. (2023). Serious game the Emotion Detectives helps to improve social–emotional skills of children with neurodevel- opmental disorders. British Journal Of Educational Technology, 55(3), 1126-1144. https://doi.org/10.1111/bjet.13420

13. Kirst, S., Diehm, R., Bögl, K., Wilde-Etzold, S., Bach, C., Noterdaeme, M., Poustka, L., Ziegler, M., & Dziobek, I. (2022). Fostering socio-emotional compe- tencies in children on the autism spectrum using a parent-assisted serious game: A multicenter randomized controlled trial. Behaviour Research And Therapy, 152, 104068. https://doi.org/10.1016/j.brat.2022.104068
14. Ryan, R.M., & Deci, E.L.(2000). Self-Determination Theory and the Facilitation of Intrinsic Motivation, Social Development, and Well-Being. American Psychologist
15. Csikszentmihalyi, M.(1990). Flow: The psychology of optimal experience. Harper.
: 10.1037110003-066X.55.1.68
16. Hunicke, R.m LeBlanc, M., & Zubek, R. (2004). MDA: A Formal Ap- proach to Game Design and Game Research.https://users.cs.northwestern.edu/ hu- nicke/MDA.pdf
17. Hernandez-Lara, Marisela and Martinez-Garcia, Ana I and Caro, Karina. (2023).Using Emotion4Down: Evaluating the Design of a Serious Video Game for Supporting Emotional Awareness with People with Intellectual Disabili- ties.https://doi.org/10.1093/iwc/iwac044
18. Deterding, Sebastian and Dixon, Dan and Khaled, Rilla and Nacke, Lennart. (2011). From Game Design Elements to Gamefulness: Defining Gamification. https://doi.org/10.1145/2181037.2181040
19. Hunicke, Robin and LeBlanc, Marc and Zubek, Robert. (2004). MDA: A formal approach to game design and game research.

Autores

Andrea Rivas Gomez is a Software Engineering and Emerging Technologies student at the Autonomous University of Baja California. She currently collaborates with the Tech4Good Research Lab, where she participates in projects focused on inclusive design and technology with social impact. Her work centers on the creation and development of accessible and inclusive designs and software.

Antonio Ramos Gonzalez is a student of Software Engineering and Emerging Technologies at the Autonomous University of Baja California. He is passionate about mobile application development and interested in creating system-level applications. He is the lead developer of Emotion4Us, a system that aims to provide emotional support for people with intellectual disabilities.

Marisela Hernández Lara is a Computer Engineer graduated from the Autonomous University of Baja California. She received her Master's degree in Computer Science from the Center for Scientific Research and Higher Education of Ensenada, Mexico (CICESE Research Center). She is currently pursuing a PhD in Computer Science at CICESE.

Brayan Iván Pérez Ventura is a Software Engineering and Emerging Technologies student at the Autonomous University of Baja California. He has research experience at the Healthcare Robotics Lab in San Diego and currently works at the Tech4Good Lab on ML-based emotion recognition models.

Ana I. Martínez G. works as a researcher at the Center for Scientific Research and Higher Education of Ensenada B.C. Mexico. She works doing research on Human Computer Interaction in support of vulnerable populations. She received her Ph.D. in Computer Science from the University of Manchester, UK.

Karina Caro is an assistant professor at the Autonomous University of Baja California (UABC), Mexico, where she directs the Technology for Social Good Research Lab. She received her Ph.D. in Computer Science from the Center for Scientific Research and Higher Education of Ensenada, Mexico (CICESE Research Center).

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

LUDICON
Recibido 23 Nov. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*
Aceptado 24 Nov. 2025

Rediseñando Odisea Emocional, una herramienta basada en gamificación para apoyar la regulación emocional de personas con discapacidad intelectual

Redesigning Odisea Emocional, a Gamification-based Tool to Supporting Emotional Regulation of Individuals with Intellectual Disabilities

Teresa Rivas Gómez[1]
rivas.teresa@uabc.edu.mx

Marisela Hernández-Lara[2]
mhernandez@cicese.edu.mx

María Fernanda López Merino[1]
maria.merino@uabc.edu.mx

Ximena Vargas Gámez[3]
ximenavg@cetys.edu.mx

Ana I. Martínez-García[2]
martinea@cicese.mx

Karina Caro[1]
karina.caro@uabc.edu.mx

3

[1] Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, BC, México.
[2] Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
[3] CETYS Universidad, Ensenada, México.

Abstract. Individuals with intellectual disabilities may experience difficulties in emotion recognition and emotional regulation, processes that are fundamental to their cognitive development and to their social, behavioral, and academic competencies. The literature reports various studies on the use of interactive technologies, such as gamification-based tools, to support the development of emotional skills in different populations. However, few tools have been specifically designed for individuals with intellectual disabilities. In response to this gap, Odisea Emocional was developed as a gamification-based tool to support therapeutic interventions for emotional regulation in individuals with intellectual disabilities. This article presents the redesign process of Odisea Emocional and the results of its expert validation. The methodology included four stages: analysis of the original design using Nielsen's heuristics, a literature review of inclusive design guidelines, development of a mid-fidelity prototype, and expert validation. The redesign incorporated elements of consistent visual identity and interface simplification. The results suggest that Odisea Emocional has the potential to support therapeutic interventions and highlight areas for improvement for its implementation.

Keywords: Emotional regulation, intellectual disabilities, gamification.

Abstract. Las personas con discapacidad intelectual pueden experi- mentar dificultades en el reconocimiento de emociones y la regulación emocional, procesos fundamentales para su desarrollo cognitivo y sus competencias sociales, conductuales y académicas. En la literatura ex- isten diversos estudios sobre el uso de tecnología interactiva, como las herramientas basadas en gamificación, para apoyar el desarrollo de habil- idades emocionales en distintas poblaciones. Sin embargo, existen pocas herramientas específicamente desarrolladas para personas con discapaci- dad intelectual. Con base en esto, se desarrolló *Odisea Emocional:* una herramienta basada en gamificación para apoyar las intervenciones ter- apéuticas de regulación emocional de personas con discapacidad intelec- tual. Este artículo presenta el proceso de rediseño de *Odisea Emocional* y los resultados de su validación con expertos. La metodología utilizada incluyó cuatro etapas: análisis del diseño original mediante heurísticas de Nielsen, revisión de literatura sobre líneas guía de diseño inclusivo, desarrollo de un prototipo de media fidelidad, y validación con expertos. El rediseño incorporó elementos de identidad visual consistente y sim- plificación de la interfaz. Los resultados sugieren que *Odisea Emocional* cuenta con el potencial para apoyar estas intervenciones terapéuticas y señalan áreas de mejora para su implementación.

Keywords: Regulación emocional, Discapacidad intelectual, Gamificación.

1 Introducción

La discapacidad intelectual es un trastorno que se caracteriza por limitaciones en el funcionamiento intelectual y el comportamiento adaptativo [2]. En el ámbito emocional, las personas con discapacidad intelectual pueden tener dificultades para identificar emociones, y su proceso de regulación emocional es más lento

que en personas neurotípicas [2, 15]. Es fundamental que las personas con discapacidad intelectual aprendan a regular sus emociones, ya que esto impulsa su desarrollo cognitivo y fortalece sus competencias sociales, conductuales y académicas [16, 18]. Actualmente, se explora el uso de tecnología interactiva, como los videojuegos y herramientas basadas en gamificación, para apoyar el desarrollo de distintas habilidades en personas con discapacidad intelectual [3, 14]. Los videojuegos se definen por sus reglas, objetivos y retos [5], mientras que las herramientas basadas en gamificación incorporan elementos de juego en con- textos no lúdicos, lo que influye en el afecto y la motivación [10]. La gamificación busca influir en el comportamiento de manera voluntaria, promoviendo tanto la motivación como el desarrollo de habilidades [19]. Su fundamento teórico se en- cuentra en corrientes psicológicas como la Teoría de la Autodeterminación que vincula la motivación intrínseca con la competencia, autonomía y relación [8], y la Teoría del Flujo la cual sostiene que la experiencia óptima de aprendizaje ocurre cuando existe un equilibrio entre el nivel de desafío de la tarea y las habilidades del individuo [7].

2024, se identificaron herramientas gamificadas dirigidas a apoyar diversas habilidades en poblaciones con discapacidad, de las cuales únicamente el 11% estaban diseñadas para personas con discapacidad intelectual [4]. Especificamente, en [12] se muestra que el uso de tecnología interactiva para apoyar distintas ha- bilidades emocionales se ha centrado en poblaciones con trastorno del espectro autista (TEA) o TDAH. Esto evidencia que el diseño y desarrollo de herramien- tas basadas en gamificación para población con discapacidad intelectual sigue siendo muy limitado.

Odisea Emocional es una herramienta basada en gamificación para apoyar las intervenciones terapéuticas de regulación emocional de personas con discapaci- dad intelectual. Este artículo presenta su proceso de rediseño y de validación con expertos.

2 Trabajo relacionado y antecedentes

El uso de tecnología interactiva para apoyar el desarrollo de habilidades emo- cionales, como la regulación emocional, ha sido ampliamente explorado en diver- sas poblaciones. Entre las propuestas identificadas se destaca la incorporación de realidad virtual, sensores vestibles y dispositivos móviles [6]. Un ejemplo es el trabajo de [13], quienes desarrollaron un juego interactivo que emplea técnicas de visión y gráficos para rastrear las características faciales del jugador y generar un avatar que imita sus expresiones. Una evaluación preliminar con nueve niños con TEA identificó diversas áreas de mejora, como la inclusión de escenarios basados en situaciones reales y la posibilidad de personalizar sonidos y personajes.

En particular, para apoyar la regulación emocional, la mayoría de los trabajos se han centrado en apoyar a poblaciones con TEA, y algunos pocos dirigidos a personas con TDAH o discapacidad intelectual [12]. Por ejemplo, WeLi [20, 21], es una aplicación para relojes inteligentes diseñada para apoyar a estudiantes con

discapacidad intelectual en su autorregulación dentro del aula de clases. Esta aplicación permite enviar alertas a los cuidadores para apoyar al estudiante en la gestión de su comportamiento. WeLi fue evaluada en dos estudios con 11 y 10 participantes, respectivamente. Los resultados mostraron una respuesta positiva por parte de los usuarios.

A pesar de que existen trabajos para apoyar distintas habilidades emocionales en diversas poblaciones como TEA o TDAH, haciendo uso de tecnología interactiva, solo unos pocos se enfocan en las características y necesidades particulares de la población con discapacidad intelectual

Para abordar esta brecha en la literatura, se diseñó e implementó *Odisea Emocional*. La primera iteración de diseño de *Odisea Emocional* se describe en [11]. En este artículo se aborda la segunda iteración de diseño, incorporando líneas guías de diseño dirigidas a la población de discapacidad intelectual. A continuación se describe *Odisea Emocional*.

2.1 Odisea Emocional

Odisea Emocional es una herramienta basada en gamificación para apoyar las in- tervenciones terapéuticas de regulación emocional de personas con discapacidad intelectual. Su objetivo es apoyar la corregulación emocional mediante actividades que se centran en reconocer emociones en rostros y situaciones cotidianas, además de identificar y practicar estrategias de afrontamiento. Sus características principales son: *Odisea Emocional*.

- **Personalización:** Permite a las terapeutas personalizar elementos, como las emociones, las etapas, las recompensas y las estrategias de afrontamiento, conforme las características y necesidades de cada usuario. Esto permite mantener al usuario en una "zona" lo suficientemente retadora para evitar el aburrimiento, pero no tan difícil como para generar frustración [7].
- **Etapas:** La herramienta incorpora la etapa de conciencia emocional (re- conocimiento de emociones) y de corregulación emocional (aprender estrate- gias de afrontamiento).Esta estructura favorece un desarrollo progresivo de las competencias y permite mantener al usuario en una zona de desafío óptima.[7, 8].
- **Emociones:** Las emociones a practicar son felicidad, tristeza, enojo y miedo.
- **Actividades:** La herramienta consta de cinco actividades que incluyen la identificación de emociones en imágenes (A1. Imágenes iguales, A2. Encuen- tra la emoción, A3. Memorama), identificación de emociones en situaciones cotidianas (A4. Emociones en la vida diaria) e identificación y práctica de estrategias de afrontamiento (A5. Estrategias de afrontamiento).
- **Modelo de interacción:** La herramienta cuenta con dos modelos de inter- acción: basado en movimiento y táctil.

3 Métodos

Para la segunda iteración de diseño de *Odisea Emocional* se siguieron las siguientes etapas:

1. **Análisis del diseño de *Odisea Emocional* :** Se analizó el diseño actual de la interfaz para detectar problemas de usabilidad y guiar el rediseño hacia una mayor facilidad de uso.
2. **Revisión de literatura sobre líneas guía de diseño:** Se realizó una revisión de literatura para identificar lineamientos de diseño de interfaces existentes que sirvieran como referencia para la nueva propuesta de diseño.
3. **Propuesta de rediseño:** A partir del análisis realizado y la revisión de lineamientos de diseño, se desarrolló una propuesta de diseño para la interfaz de *Odisea Emocional* mediante un prototipo de media fidelidad.
4. **Sesiones de validación con expertos:** Para validar la propuesta de redis- eño, se realizaron tres sesiones de validación con una psicóloga, una maestra de educación especial y una terapeuta de lenguaje.

4 Análisis del diseño de Odisea Emocional y revisión de lineas guía de diseño

El objetivo de esta etapa fue analizar el diseño de la interfaz de *Odisea emocional* para identificar posibles problemas de usabilidad y emitir recomendaciones para mejorar su diseño. Este análisis fue realizado por dos miembros del equipo de investigación con base en las diez heurísticas de Nielsen [17], las cuales son un conjunto de principios generales de usabilidad para el diseño de interfaces de usuario. Los resultados de esta etapa incluyen un conjunto de recomendaciones para la propuesta de rediseño de la interfaz (Tabla 1).

Tabla 1: Recomendaciones con base en la literatura para el rediseño de *Odisea Emocional*.

Categoría	Recomendaciones
Navegación y control de la sesión	Agregar opciones para pausar y salir de las actividades.
	Incluir botones para avanzar y retroceder en las actividades.
	Implementar una opción para guardar la sesión de un usuario.
Diseño visual	Definir una paleta de colores adecuada y mejorar el contraste de los botones.
	Establecer una identidad visual consistente.
	Mejorar la coherencia entre el diseño de la interfaz y las imágenes utilizadas.
Usabilidad y accesibilidad	Reducir la cantidad de elementos por pantalla y mejorar la jerarquía visual.
	Implementar opciones de accesibilidad para usuarios con dificultades visuales.

Por otro lado, la revisión de las líneas guía de diseño inclusivo y accesible [9, 1] permitió identificar elementos clave para guiar el rediseño con base en las necesidades de las personas con discapacidad intelectual. Los principios clave identificados fueron:

- Lenguaje simple: Uso de lenguaje simple y conciso para facilitar el uso de la herramienta.
- Uso de convencionalismos: Utilizar elementos que los usuarios ya conocen. Por ejemplo, el ícono de una casa para ir a la página de inicio.
- Retroalimentación inmediata: Proporcionar al usuario retroalimentación sobre las tareas realizadas correctamente o si hubo algun error durante el proceso.

|

5 Propuesta de rediseño

Con base en los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se realizó una propuesta de rediseño para la interfaz de la herramienta, la cual fue implementada en un prototipo de media fidelidad utilizando a herramienta de diseño Figma.

La Figura 1 muestra la propuesta de identidad visual de la herramienta. Se definió una temática espacial, creando un logotipo con el nombre de *Odisea Emocional* y un ajolote como mascota. Los planetas y el sol se utilizan para representar las cuatro emociones incluidas en la herramienta, dentro de una paleta de colores con tonos morados, azules, naranjas, rosas y rojos.

Fig. 1: Pantalla principal de Odisea Emocional.

En la Figura 2 se muestra el rediseño del módulo de personalización donde se aplicó la nueva identidad visual, reorganizando el contenido para simplificar la interfaz e incorporando una barra de estado que informa al usuario sobre su progreso en la configuración.

Las Figuras 3 y 4 muestran el rediseño de la interfaz de las cinco actividades de *Odisea Emocional*. Para mantener la consistencia del diseño, todas las actividades utilizan el mismo fondo y paleta de colores que la pantalla principal (Figura 1). Se agregaron opciones para mejorar la navegación y control de la sesión, por ejemplo, botones para regresar a la pantalla principal, pausar la actividad y salir de la actividad. Además, se agregó una barra de progreso con estrellas que permite al usuario ver cuántos ensayos le quedan por realizar. Este elemento busca satisfacer la necesidad de competencia, ya que permite al usuario monitorear sus avances y logros, tal como se plantea en la teoría de la autodeterminación [8].

Fig. 2: Módulo de personalización.

Actividad 1- Imágenes iguales | Actividad 2- Encuentra la emoción | Actividad 3- Memorama | Actividad 4- Emociones en la vida diaria

Fig. 3: Rediseño de las actividades de conciencia emocional.

Fig. 4: Rediseño de la actividad de corregulación emocional.

6 Sesiones de validación

Para validar el rediseño de *Odisea Emocional*, se realizaron tres sesiones de validación con expertos. El objetivo fue validar la claridad visual, el lenguaje utilizado, la accesibilidad y usabilidad del prototipo.

Los participantes de estas sesiones fueron una psicóloga, una maestra de edu- cación especial y una terapeuta de lenguaje. Todas colaboran en distintos centros donde se ofrece apoyo educativo y terapéutico a personas con discapacidad intelectual (Tabla 2).

Tabla 2: Resumen de las sesiones de validación.

# Sesión	Participantes	Duración
1	1 psicóloga	01:08:51 hrs
2	1 maestra de educación especial/ 1 psicóloga	00:56:31 hrs
3	1 terapeuta de lenguaje	01:25:00 hrs

6.1 Metodología

La metodología utilizada se dividió en tres etapas:

1. Presentación del proyecto: Se presentó la motivación del proyecto y el objetivo de la herramienta.
2. Objetivo de la sesión: Se explicó a los participantes en qué consistiría su participación y la importancia de su retroalimentación para el rediseño de la interfaz de la herramienta.
3. Revisión del diseño de la interfaz: Se presentaron distintos flujos de tareas clave de la herramienta, como la personalización y la realización deactividades. Posteriormente se explicó a los participantes el objetivo de cada tarea y cómo podían interactuar con el prototipo.

Todas las sesiones fueron videograbadas y posteriormente transcritas para su análisis cualitativo.

6.2 Resultados

El análisis de las sesiones identificó múltiples áreas de mejora en el diseño visual y funcional de *Odisea Emocional*. Los resultados principales fueron:

- **Diseño visual:** Se identificó que algunos fondos estaban sobrecargados y podían ser elementos distractores que dificulten la concentración de los usuarios durante las actividades. Se detectaron también problemas de legibilidad por tipografías con bajo contraste o tamaños reducidos en botones e in- strucciones. Se propuso incorporar un filtro para atenuar la saturación de la interfaz y sustituir los fondos con diversos elementos, por fondos degradados o lisos.

- **Instrucciones:** Las expertas destacaron la necesidad de instrucciones más claras y consistentes, incluyendo el uso de tutoriales breves o guías paso a paso.
- **Lenguaje:** Se observó la necesidad de simplificar términos técnicos como "reforzador parcial" para mejorar la comprensión.
- **Personalización:** Se requiere mayor control durante las actividades (como pausar o saltar tareas sin perder el progreso), reorganización de menús y uso de filtros para acceso rápido a funciones frecuentes.
- **Actividades:** Se sugirió implementar niveles de dificultad para adaptarse a los distintos niveles de discapacidad intelectual. Para la actividad 4- Emociones en la vida diaria, recomendaron usar videos con situaciones familiares para los usuarios (como en casa o en el parque), ya que esto mejora la retención de información, lo cual se alinea con la teoría del flujo [7], la cual plantea que un sistema gamificado debe equilibrar los desafíos con las habilidades del usuario.

7 Conclusiones y trabajo a futuro

Este artículo presentó el proceso de rediseño y validación de la interfaz de *Odisea Emocional*, una herramienta basada en gamificación para apoyar las intervenciones terapéuticas de regulación emocional de personas con discapacidad intelectual. El rediseño se fundamentó en una evaluación basada en las heurísticas de Nielsen y en la revisión de guias de diseño de la literatura. Posteriormente, se implementó un prototipo de media fidelidad que se validó con expertos en psicología y educación especial, obteniendo propuestas para mejorar la herramienta.

Los resultados indican que *Odisea Emocional* cuenta con el potencial para ser una herramienta que sea utilizada como apoyo durante las intervenciones terapéuticas con personas con discapacidad intelectual.

Como trabajo futuro, se pretende desarrollar un prototipo de alta fidelidad que incorpore las modificaciones necesarias para mejorar la usabilidad y la fa- cilidad de uso de la herramienta. se contempla implementar tutoriales para los terapeutas e incorporar niveles de dificultad en las actividades, para permitir una adaptación progresiva a las necesidades de los usuarios. Posteriormente, se planifica validar la usabilidad de la herramienta con personas con discapacidad intelectual y terapeutas, realizar los ajustes pertinentes y llevar a cabo una evaluación a largo plazo para determinar cómo *Odisea Emocional* apoya a las intervenciones terapéuticas de regulación emocional en esta población.

References

1. Alonso-Virgos, L., Pascual Espada, J., Rodríguez Baena, L., Crespo, R.G.: Design specific user interfaces for people with down syndrome using suitable wcag 2.0 guidelines. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing **9**(5), 1359– 1374 (2018)
2. Association, A.P.: Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Washing- ton, DC: American Psychiatric Association (2014)
3. Bonet-Codina, N., von Barnekow, A., Tost, D.: Integragame: a real-life inspired se- rious game for social and professional training of people with intellectual disability. pp. 10–13 (10 2015). https://doi.org/10.1145/2838944.2838947
4. Boubakri, M., Nafil, K.: Gamification solutions for persons with disabilities: a systematic literature review. Universal Access in the Information Society **24**(2), 1009–1035 (2024)
5. Cheng, M.T., Chen, J.H., Chu, S.J., Chen, S.Y.: The use of serious games in science education: a review of selected empirical research from 2002 to 2013. Journal of Computers in Education **2** (07 2015). https://doi.org/10.1007/s40692-015-0039-9
6. Colombo, D., Fernández-Álvarez, J., Garcia Palacios, A., Cipresso, P., Botella, C., Riva, G.: New technologies for the understanding, assessment, and intervention of emotion regulation. Frontiers in psychology **10**, 1261 (2019)
7. Csikszentmihalyi, M.: Flow and Education. Springer Netherlands (2014). https://doi.org/10.1007/978-94-017-9094-9_6
8. Deci, E.L., Ryan, R.M.: Handbook of self-determination research. University Rochester Press (2004)
9. Dekelver, J., Kultsova, M., Shabalina, O., Borblik, J., Pidoprigora, A., Romanenko, R.: Design of Mobile Applications for People with Intellectual Disabilities, vol. 535, pp. 823–836 (12 2015). https://doi.org/10.1007/978-3-319-23766-4_65
10. Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., Nacke, L.: From game design ele- ments to gamefulness: Defining gamification. vol. 11, pp. 9–15 (09 2011). https://doi.org/10.1145/2181037.2181040
11. Hernández-Lara, M., Caro, K., Martínez-García, A.I.: Supporting the cognitive development of individuals with intellectual disabilities through a video game for emotional regulation. ReCIBE, Revista electrónica de Computación, Informática, Biomédica y Electrónica **13**(3), E7–11 (2024)
12. Hernández-Lara, Marisela, C.K., Martínez-García, A.I.: Technology for sup- porting emotion regulation of individuals with developmental disabilities : A scoping review. Research in Developmental Disabilities **136** (2023). https://doi.org/10.1016/j.ridd.2023.104467
13. Jain, S., Tamersoy, B., Zhang, Y., Aggarwal, J.K., Orvalho, V.: An interactive game for teaching facial expressions to children with autism spectrum disorders. 5th International Symposium on Communications Control and Signal Processing, ISCCSP 2012 (May) (2012). https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2012.6217849
14. Martinez-Millana, A., Michalsen, H., Berg, V., Anke, A., Gil Martinez, S., Muzny, M., Torrado Vidal, J.C., Gomez, J., Traver, V., Jaccheri, L., Hartvigsen, G.: Moti- vating physical activity for individuals with intellectual disability through indoor bike cycling and exergaming. International Journal of Environmental Research and Public Health **19**(5) (2022). https://doi.org/10.3390/ijerph19052914
15. Pereira, C., Faria, S.M.d.M.: Emotional development in children with intellectual disability-a comparative approach with “normal” children. (2013)
16. Silkenbeumer, J., Schiller, E.M., Holodynski, M., Kärtner, J.: The role of co- regulation for the development of social-emotional competence. Journal of Self- regulation and Regulation **2**, 17–32 (2016)
17. Taft, T., Staes, C., Slager, S., Weir, C.: Adapting nielsen’s design heuristics to dual processing for clinical decision support. In: AMIA Annual Symposium Proceedings. vol. 2016, p. 1179 (2017)

18. Vieillevoye, S., Nader-Grosbois, N.: Self-regulation during pretend play in chil- dren with intellectual disability and in normally developing children. Research in developmental disabilities **29**(3), 256–272 (2008)
19. Werbach, K.: (re) defining gamification: A process approach. In: International con- ference on persuasive technology. pp. 266–272. Springer (2014)
20. Zheng, H., Motti, V.G.: Weli: A smartwatch application to assist students with intellectual and developmental disabilities. ASSETS 2017 - Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility pp. 355–356 (2017). https://doi.org/10.1145/3132525.3134770
21. Zheng, H., Motti, V.G., Giwa-Lawal, K., Evmenova, A., Graff, H.: Evaluating WELI: A wrist-worn application to assist young adults with neurodevelopmental disorders in inclusive classes, vol. 11747 LNCS. Springer International Publishing (2019). https://doi.org/10.1007/978-3-030-29384-0_7

Autores

Teresa Rivas Gómez es estudiante de Ingeniería en Software y Tecnologías Emergentes en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Actualmente colabora en el laboratorio Tech4Good Research Lab, donde participa en proyectos enfocados en diseño inclusivo y tecnología con impacto social. Su trabajo se centra en la creación de interfaces accesibles y significativas, integrando creatividad, empatía y funcionalidad.

Marisela Hernández Lara es Ingeniera en Computación egresada de la Universidad Autónoma de Baja California. Obtuvo su grado de Maestría en Ciencias de la Computación en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México (CICESE). Actualmente cursa el doctorado en Ciencias de la Computación en CICESE.

María Fernanda López Merino cursa actualmente la Licenciatura en Ingeniería de Software y Tecnologías Emergentes en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), campus Ensenada, México.

Ximena Vargas Gámez es estudiante de Ingeniería de Software en el Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS). Ha participado en proyectos de investigación y diseño enfocados en tecnología inclusiva y accesible. Sus intereses abarcan el diseño UI/UX, desarrollo web y sistemas interactivos.

Ana I. Martínez G. trabaja como investigadora en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., México. Su labor se centra en la investigación en Interacción Humano-Computadora en apoyo a poblaciones vulnerables. Obtuvo su doctorado en Ciencias de la Computación por la Universidad de Manchester, Reino Unido.

Karina Caro es profesora asistente en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), México, donde dirige el Laboratorio de Investigación en Tecnología para el Bien Social. Obtuvo su doctorado en Ciencias de la Computación en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México (CICESE).

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

Recibido 23 Nov. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*
Aceptado 24 Nov. 2025

Uso de un Videojuego Cooperativo para Evaluar la Comunicación en Equipos Distribuidos de Desarrollo de Software

Use of a Cooperative Video Game to Evaluate Communication in Distributed Software Development Teams

Zeus Cobian[1]
zeus.gutierrez0065@alumnos.udg.mx
Adriana Peña[1]
adriana.pena@cucei.udg.mx
David Bonilla Carranza[1]
jose.bcarranza@academicos.udg.mx

[1] CUCEI Universidad de Guadalajara, Blvrd. Marcelino García Barragán #1421, esq. Calzada Olímpica, 44430 Guadalajara, Jalisco, Mexico

Abstract. Se presenta un estudio experimental que evalúa la calidad de la comunicación en línea dentro de equipos distribuidos de desarrollo de software mediante el videojuego cooperativo Keep Talking and Nobody Explodes. Se diseñó un experimento de enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo) en el que parejas de participantes, comunicadas en remoto, colaboran bajo presión para desactivar artefactos virtuales. A través de registros de observación y análisis automatizado de las interacciones verbales, se identificaron indicadores clave de la eficacia comunicativa, tales como claridad de los mensajes, rapidez de respuesta, uso de muletillas, lectura literal de instrucciones y balance en la participación. Los resultados muestran diferencias significativas entre equipos con comunicación efectiva y deficiente, evidenciando que factores como la adaptación al contexto, la estructuración del discurso y la cooperación entre roles distinguen a los equipos de mejor desempeño. El videojuego demostró ser una herramienta válida para simular entornos colaborativos reales, proporcionando datos replicables y comparables con dinámicas de proyectos de software distribuidos. Este trabajo propone un marco metodológico innovador para la evaluación de habilidades de comunicación en equipos remotos, con implicaciones tanto teóricas (en la medición de soft skills) como prácticas en la gestión y entrenamiento de equipos de desarrollo de software.

Palabras clave: Comunicación en línea · Equipos distribuidos · Desarrollo de software · Videojuegos cooperativos · Habilidades de comunicación

Abstract.
An experimental study is presented that evaluates the quality of online communication within distributed software development teams using the cooperative video game *Keep Talking and Nobody Explodes*. A mixed-methods (qualitative–quantitative) experimental design was implemented in which pairs of participants, communicating remotely, collaborated under pressure to defuse virtual artifacts. Through observation logs and automated analysis of verbal interactions, key indicators of communicative effectiveness were identified, such as message clarity, response speed, use of filler words, literal reading of instructions, and balance of participation. The results show significant differences between teams with effective and poor communication, demonstrating that factors such as contextual adaptation, discourse structuring, and cooperation between roles distinguish higher-performing teams. The video game proved to be a valid tool for simulating real collaborative environments, providing replicable data comparable to the dynamics of distributed software projects. This work proposes an innovative methodological framework for evaluating communication skills in remote teams, with both theoretical implications (in the measurement of soft skills) and practical applications in the management and training of software development teams.

Keywords: Online communication · Distributed teams · Software development · Cooperative video games · Communication skills

1 Introducción

En los últimos años, la comunicación en línea se ha convertido en un pilar fundamental para el funcionamiento de equipos de desarrollo de software, especialmente a medida que el trabajo remoto y distribuido se vuelve más común [3][7][10]. La colaboración a distancia plantea retos significativos en la coordinación, el intercambio de información y la resolución conjunta de problemas en tiempo real, lo cual puede afectar la productividad y la calidad de los proyectos [4][9]. La comunicación mediada por tecnología no solo implica transmitir texto o voz, sino que también conlleva aspectos no verbales (tono, intención, retroalimentación inmediata) cuya ausencia o distorsión puede generar malentendidos [6].

De hecho, la falta de comunicación efectiva en equipos distribuidos puede derivar en retrasos, errores y una menor cohesión del equipo [5][9]. A pesar de la proliferación de herramientas de colaboración como Slack®, Microsoft Teams® o Zoom®, el verdadero desafío radica en cómo se utilizan estas plataformas y en la capacidad del equipo para mantener una interacción fluida y clara a través de ellas [7][10][11]. Diversos estudios han subrayado que las fallas en proyectos de desarrollo suelen atribuirse más a factores humanos y de equipo que a problemas técnicos, resaltando la necesidad de mejorar las dinámicas comunicativas en entornos de desarrollo globales [4][9].

En este contexto, surge la necesidad de métodos innovadores para evaluar y fortalecer la comunicación en equipos de software distribuidos. Las aproximaciones tradicionales (p. ej., encuestas, entrevistas o autoevaluaciones) pueden carecer de objetividad y no siempre reflejan las situaciones reales de trabajo [12]. Por ello, proponemos un enfoque experimental basado en un juego cooperativo, aprovechando técnicas de gamificación para simular escenarios de colaboración remota [10].

Estudios previos han demostrado que los videojuegos pueden servir como herramientas educativas y de evaluación de soft skills en contextos profesionales [4][10]. En particular, ciertos juegos fomentan la cooperación y el trabajo en equipo bajo reglas y metas compartidas [5][8]. La literatura reporta casos de uso de videojuegos cooperativos para estudiar comportamientos grupales; por ejemplo, Keep Talking and Nobody Explodes se ha empleado para investigar la comunicación y el liderazgo bajo condiciones de alta presión [10]. Este es un juego de puzzle cooperativo en el que un miembro del equipo (el ejecutor) debe desactivar una “bomba” siguiendo las instrucciones verbales de otro miembro (el experto), quien posee un manual pero no puede ver el artefacto. Esta dinámica de información distribuida y dependencia mutua requiere una comunicación constante, clara y eficaz, análoga a las situaciones de trabajo remoto en desarrollo de software donde los roles deben coordinarse sin compartir físicamente el contexto de la tarea [7][10].

Keep Talking and Nobody Explodes ofrece un entorno controlado e inmersivo para observar cómo los equipos gestionan información y resuelven problemas colaborativamente cuando la comunicación es el único medio para el éxito [10]. Sus mecánicas imponen condiciones de alta presión temporal y dividen las responsabilidades en roles complementarios, lo que reproduce desafíos típicos de los equipos distribuidos (como la necesidad de sincronización y entendimiento común mediante canales limitados) [5][9].

La Tabla 1 resume la relación entre algunas mecánicas clave del juego y las habilidades de comunicación y colaboración en equipos de desarrollo de software (título propuesto: "Relación entre mecánicas de Keep Talking and Nobody Explodes y habilidades comunicativas en el desarrollo de software"). Dicha tabla ilustra, por ejemplo, cómo la resolución de módulos de cables o códigos en el juego requiere una transmisión precisa de instrucciones, similar a la necesidad de claridad al asignar tareas técnicas; o cómo la gestión del tiempo en la cuenta regresiva del juego refleja la urgencia en la comunicación durante situaciones críticas en proyectos reales [3][5][7].

En síntesis, este trabajo aborda la evaluación de la comunicación en línea en equipos de desarrollo de software mediante la incorporación de un videojuego cooperativo como instrumento experimental. Se busca así contribuir a la comprensión de las dinámicas comunicativas en entornos distribuidos y proponer estrategias para su mejora.

La relevancia científica radica en combinar métodos de las ciencias del comportamiento (observación y análisis cualitativo) con herramientas tecnológicas (análisis automático de conversaciones) en un marco lúdico, algo poco explorado en la literatura de ingeniería de software [10][12]. Asimismo, en un mundo post-pandemia con empresas globalizadas, optimizar la comunicación de equipos remotos se ha vuelto crítico, por lo que esta investigación ofrece hallazgos de interés tanto académicos como aplicados [2][10][11].

Table 1. Relación entre las mecánicas del videojuego Keep Talking and Nobody Explodes y habilidades comunicativas en equipos de desarrollo de software.

Módulo / Dinámica del Juego	Habilidad Comunicativa Requerida.
Módulo de cables complejos	Precisión en descripciones y escucha activa
Módulo de palabras en clave	Confirmación mutua de entendimiento
Módulo de símbolos	Claridad en la descripción de formas abstractas
Módulo de botones	Capacidad de interpretación contextual
Módulo de laberinto	Orientación espacial y uso de referencias claras
Módulo de secuencia de colores	Reconocimiento de patrones y coordinación verbal
Cuenta regresiva (bomba)	Gestión del tiempo y priorización colaborativa
Rotación de roles (Ejecutor/Experto)	Adaptabilidad en la comunicación y liderazgo compartido

2 Objetivo e Hipótesis

El objetivo principal de este estudio es evaluar la eficacia de la comunicación en línea en equipos distribuidos de desarrollo de software mediante una actividad colaborativa basada en un videojuego, identificando qué características comunicativas distinguen a los equipos de alto desempeño de aquellos con dificultades. En particular, se busca determinar si el desempeño comunicativo observado durante la dinámica del juego refleja la capacidad de coordinación y entendimiento mutuo que los equipos demuestran en entornos laborales remotos reales.

A partir de lo anterior, se plantea la siguiente hipótesis de trabajo: la utilización de un videojuego cooperativo permitirá distinguir de manera efectiva entre equipos con comunicación en línea eficiente y deficiente; en específico, se espera que los equipos que logren comunicarse con claridad, rapidez y coordinación durante el juego obtengan un desempeño significativamente superior (p. ej., resolverán más módulos/bombas) en comparación con aquellos equipos cuya comunicación presente falencias.

Esta hipótesis implica que existen patrones medibles de comunicación asociados al éxito en tareas colaborativas, y que un entorno lúdico-controlado puede sacar a la luz dichas diferencias de forma reproducible.

3 Metodología

Para probar la hipótesis se diseñó un experimento de laboratorio con equipos simulados de desarrollo de software, haciendo uso del videojuego cooperativo Keep Talking and Nobody Explodes como medio para generar la interacción. A continuación, se describen los participantes, el diseño experimental, el procedimiento llevado a cabo y las técnicas de recolección/análisis de datos empleadas. Participantes: Se contó con 25 participantes voluntarios, todos estudiantes de posgrado o jóvenes profesionistas en áreas afines a Tecnologías de la Información y desarrollo de software. La edad promedio fue de ~26 años (rango 23–29) y la distribución de género incluyó 15 hombres y 10 mujeres.

Los participantes poseían experiencia básica en comunicación mediante herramientas digitales (videollamadas, chats) y se asumió un nivel homogéneo en familiaridad con videojuegos cooperativos para minimizar sesgos. Antes del experimento, se aseguró el consentimiento informado de cada individuo, y se garantizó su anonimato en el manejo de los datos. Cabe destacar que, debido a la naturaleza colaborativa de la tarea, los participantes trabajaron en parejas a lo largo de todo el experimento.

Los emparejamientos fueron conformados libremente por afinidad, pero una vez establecidos se mantuvieron fijos durante todas las sesiones (es decir, cada pareja de participantes interactuó únicamente entre sí). Diseño experimental: Cada pareja se enfrentó a una serie de sesiones de juego en línea utilizando Keep Talking and Nobody Explodes. En cada sesión, uno de los participantes asumió el rol de Ejecutor (quien visualiza la “bomba” en la interfaz del juego) y el otro el rol de Experto (quien posee el manual de desactivación en formato PDF).

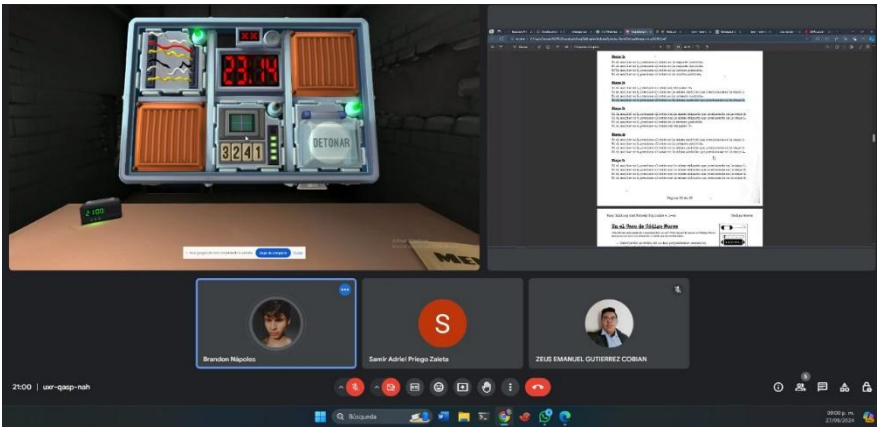


Fig. 1. Captura de pantalla de una sesión experimental – Comunicación entre Ejecutor y Experto durante la tarea de desactivación.

El desafío colaborativo consiste en desactivar correctamente varios módulos del artefacto antes de que termine el tiempo, lo cual solo es posible mediante una comunicación verbal efectiva: el Ejecutor describe los componentes del módulo y sigue las indicaciones que el Experto deduce consultando el manual. Al inicio de la prueba, se brindaron a ambos participantes instrucciones generales sobre la mecánica del juego y se les permitió familiarizarse brevemente con el manual. Cada pareja realizó dos rondas principales: en la primera ronda A, el participante X fue Ejecutor y Y fue Experto; luego, en la segunda ronda B, intercambiaron los roles (Y ejecutor, X experto) para que todos experimentaran ambas perspectivas de comunicación.

Esta rotación de roles busca equilibrar posibles efectos individuales y permitir evaluar las habilidades comunicativas de cada persona en ambas funciones (emisor de instrucciones vs. receptor-ejecutor). Todas las sesiones se realizaron en modalidad remota: los participantes se encontraban físicamente separados y se comunicaron a través de una videollamada de Google Meet® habilitada para tal fin. Durante el experimento se aplicaron condiciones uniformes para todos los equipos. Por ejemplo, se estableció un tiempo límite estándar para resolver cada bomba (manteniendo la presión temporal típica del juego) y se utilizaron siempre las mismas configuraciones de dificultad en los módulos a desactivar. Asimismo, se controló que la calidad de audio de las videollamadas fuera adecuada y sin interrupciones significativas.

Las sesiones de juego fueron grabadas en video y audio para su posterior análisis. Al finalizar las rondas, se realizó un breve debriefing con cada pareja, en el cual se les pidió que comentaran su percepción sobre la comunicación lograda (dificultades enfrentadas, estrategias utilizadas, etc.), con fines complementariamente cualitativos.

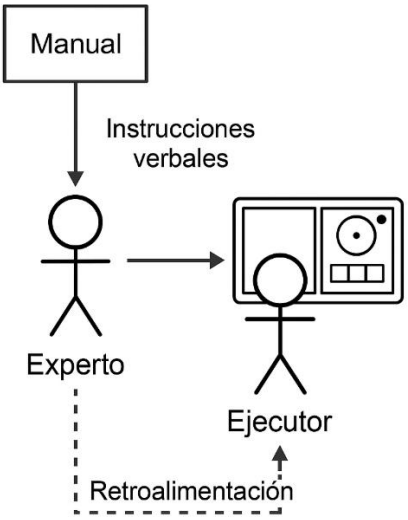


Fig. 2. Diseño experimental del estudio con roles de comunicador y ejecutor en Keep Talking and Nobody Explodes

4 Resultados

A nivel de desempeño en la tarea colaborativa, se observaron contrastes marcados entre los equipos con buena y mala comunicación. Del total de parejas, alrededor de un tercio logró desactivar exitosamente más de una bomba dentro del límite de tiempo (incluso avanzando a bombas de mayor complejidad), evidenciando comunicación altamente efectiva. En cambio, aproximadamente 20% de las parejas fracasaron en desactivar la primera bomba o apenas completaron un módulo antes de agotar el tiempo, reflejando comunicación deficiente; el resto de las parejas se situó en desempeños intermedios.

Los equipos de comunicación efectiva demostraron una coordinación notable: típicamente adoptaron un ritmo de diálogo ágil y organizado, con intercambios frecuentes de información para verificar entendimientos. Por ejemplo, en estos equipos se registró que el *Experto* proporcionaba instrucciones claras y segmentadas (p. ej., “corta el cable rojo después de presionar el botón azul, pero solo si el indicador X está encendido”), y el *Ejecutor* respondía con confirmaciones inmediatas ("copiado", "entendido") antes de actuar, asegurando así un entendimiento mutuo sólido. Asimismo, dichos equipos mantuvieron un balance en la conversación: ambos miembros aportaban casi por igual al diálogo, alternando turnos para preguntar y confirmar, lo cual indica una bidireccionalidad saludable en la comunicación.

Como consecuencia, estos equipos resolvieron los puzzles con relativa eficiencia, completando en promedio ~2.5 módulos por minuto, significativamente por encima de los ~1.2 módulos/minuto de los equipos menos efectivos (valores ilustrativos; ver Tabla 2).

En contraste, los equipos con comunicación deficiente presentaron varios síntomas característicos. Su interacción tendía a ser desorganizada y con frecuentes lapsos de silencio o confusión. Se documentaron casos donde el *Experto* leía largos párrafos del manual literalmente sin adaptar el mensaje, abrumando al *Ejecutor* con información poco digerible; simultáneamente, el *Ejecutor* a veces se limitaba a repetir fragmentos de las instrucciones en voz alta sin solicitar aclaraciones, evidenciando que no comprendía del todo pero tampoco lo comunicaba. Este patrón de *lectura literal y eco* llevó a bucles de incomprensión: por ejemplo, en un módulo de cables se oyó al *Ejecutor* recitar las series de colores tal cual se describen en el manual, esperando que el *Experto* detectara el error, en lugar de reformular o señalar cuál era exactamente su duda. También fueron comunes las muletillas y pausas: equipos con mal desempeño llegaron a acumular más del doble de muletillas por minuto que los equipos efectivos (ejemplo: “eh... el símbolo es como eh... una especie de P, no, espera... no sé si me explico…”), lo que indica vacilación y falta de fluidez. Estas interrupciones constantes, junto con la ausencia de confirmaciones, derivaron en malentendidos no resueltos a tiempo. Un ejemplo ilustrativo fue un equipo que interpretó erróneamente una instrucción sobre cortar un cable “después del tercer parpadeo” debido a que no se confirmó mutuamente el significado; este fallo de comunicación les costó reiniciar la secuencia completa, consumiendo un tiempo crítico.

Table 2. Comparativa de indicadores cuantitativos de comunicación entre equipos con comunicación efectiva vs. comunicación deficiente.

Indicador	Equipos con Comunicación Efectiva	Equipos con Comunicación Deficiente
Número promedio de módulos resueltos	6.8	2.3
Tiempo promedio por módulo (segundos)	45	87
% de turnos de palabra por participante (equilibrio)	48% - 52%	70% - 30%
Frecuencia de muletillas (por minuto)	3.2	8.7
Retraso promedio en responder (segundos)	1.5	4.6
% de instrucciones leídas literalmente	15%	72%

En términos cuantitativos, estos equipos con problemas mostraron respuestas más lentas (intervalos de varios segundos o más entre pregunta y respuesta), muchas instrucciones debieron repetirse y aun así quedaron sin ejecutar correctamente, y en los videos se apreció una evidente frustración y estrés creciente entre los participantes a medida que el cronómetro avanzaba.

Al analizar comparativamente los indicadores de comunicación entre ambos extremos, emergen diferencias estadísticamente significativas. Los equipos eficaces lograron tiempos de respuesta sensiblemente menores (respondiendo casi instantáneamente tras escuchar la indicación, salvo para procesar información compleja), emplearon menos de la mitad de muletillas que los equipos ineficaces, y tuvieron una participación balanceada con aproximadamente 45–55% de las palabras pronunciadas por cada rol en promedio.

Además, en los equipos efectivos prácticamente no se observaron lecturas textuales extensas del manual; por el contrario, el *Experto* solía parafrasear o resumir las instrucciones en sus propias palabras, adaptándolas al contexto que describía el *Ejecutor*. Esto contrasta con los equipos de bajo desempeño, donde más del 70% de las instrucciones del *Experto* fueron leídas textualmente sin comprobación de entendimiento.

Cabe mencionar que la capacidad de adaptación durante el juego se perfiló como un factor crucial: los mejores equipos ajustaban su estrategia comunicativa según el módulo (por ejemplo, adoptando un lenguaje más técnico para un puzzle de cables versus un enfoque más descriptivo para símbolos), mientras que los equipos débiles mantenían un estilo rígido de comunicación que no siempre encajaba con la naturaleza del problema en cuestión. También se notó que en los equipos eficaces uno de los miembros solía asumir un rol sutil de líder comunicativo –no imponiéndose, sino organizando la conversación (por ejemplo, proponiendo un orden para atender los módulos y repartiendo las responsabilidades de forma explícita: "primero resolvamos el módulo de contraseña y luego pasamos al de cables")–, a diferencia de los equipos ineficaces donde ninguno tomó la iniciativa para estructurar la interacción. Estos hallazgos confirman que, tal como se postuló, el videojuego permitió distinguir patrones de comunicación exitosos y fallidos de forma objetiva.

5 Conclusiones

Este artículo presentó una investigación que integra elementos de juego, software y análisis de comportamiento para abordar un problema crítico en la actualidad: la evaluación de la comunicación en línea en equipos de desarrollo de software distribuidos. A través del videojuego cooperativo Keep Talking and Nobody Explodes, se logró recrear un escenario de colaboración remota bajo presión que sacó a flote las fortalezas y debilidades comunicativas de distintos equipos. Los hallazgos obtenidos confirmaron que dicha herramienta experimental es adecuada para distinguir la eficacia comunicativa de los equipos, al punto de correlacionar claramente las buenas prácticas de comunicación con el éxito en la tarea, y las malas prácticas con el fracaso o bajo rendimiento.

En efecto, se comprobó la hipótesis de que los equipos con comunicación efectiva (caracterizada por claridad, rapidez, adaptabilidad y retroalimentación constante) sobresalen en el cumplimiento de objetivos conjuntos, a diferencia de aquellos con deficiencias en su interacción.Desde una perspectiva científica, este trabajo aporta un marco replicable para el estudio de la comunicación en entornos distribuidos: combina un enfoque mixto de análisis y aprovecha la gamificación para generar datos objetivos sin sacrificar realismo situacional.
Esto sienta un precedente para futuras investigaciones que busquen cuantificar habilidades sociales o blandas en contextos de ingeniería de software, un área tradicionalmente dominada por la evaluación de habilidades técnicas. Además, se contribuye a la literatura que vincula los campos de juegos serios y procesos de desarrollo de software, evidenciando cómo un entorno de juego adecuadamente escogido puede fungir como banco de pruebas de dinámicas de equipo.

En el plano aplicado, las implicaciones directas de este estudio sugieren que las empresas y equipos pueden beneficiarse de la inclusión de actividades colaborativas gamificadas para fortalecer la comunicación interna. No solo como diagnóstico –identificando equipos o individuos que requieran capacitación específica– sino también como entrenamiento activo, dado que los participantes, al enfrentarse a estos retos, practican y afinan sus maneras de comunicarse. Por ejemplo, integrar una sesión como esta en la inducción de un equipo remoto podría acelerar la cohesión y establecer desde temprano protocolos de comunicación efectiva entre sus miembros.

En conclusión, Keep Talking and Nobody Explodes probó ser más que un juego: se consolidó como una plataforma experimental valiosa para estudiar y mejorar la comunicación en equipos distribuidos. Los resultados presentados invitan a continuar esta línea de investigación, extendiéndola a nuevos escenarios y herramientas, con el objetivo último de desarrollar equipos de desarrollo de software más conectados, coordinados y resilientes a la distancia. Si bien la tecnología nos ofrece canales para comunicarnos, este estudio reafirma que la verdadera eficacia reside en cómo usamos esos canales, y que con las estrategias adecuadas –incluso lúdicas– podemos diagnosticar y potenciar esa comunicación para que no explote la bomba de los proyectos de software colaborativo.

References

[1] Alberto Andreu Pinillos (1996). Comunicación interna, un paseo por el tiempo.
[2] Morales Torres, Marioxy, et al. (2021). Virtual environments from the ontology of new knowledge of higher education in times of covid -19 pandemic.
[3] EBERT, Christof; DUARTE, Carlos Henrique C. Digital transformation. IEEE Softw., 2018, vol. 35, no 4, p. 16 -21.
[4] Ahmed, F., Capretz, L. F., & Campbell, P. (2012). Evaluating the Demand for Soft Skills in Software Development.
[5] Cohen, P.R., & Levesque, H.J. (1991). Teamwork. Nous, 25(4), 487-512. DOI: 10.2307/2216020
[6] Carmona, J. B. R. (2010). La videoconferencia. Comunicar, 17(34), 235.
[7] Ramírez Morales, F. J. (2008). Prácticas, metodologías y herramientas para la gestión y ejecución de proyectos de desarrollo de software que utilicen equipos de trabajo geográficamente distribuidos.
[8] Marín-Flores, M. (2024). El teletrabajo y la docencia universitaria en Venezuela: Experiencia de la Universidad Nacional Experimental de las Telecomunicaciones e Informática.
[9] Colomo-palacios, R., et al. (2014). Project managers in global software development teams.
[10] Peña Pérez Negrón, A., et al. (2021). Adaptación al uso tecnología en el ámbito educativo durante la pandemia derivada del COVID-19 en México.
[11] Mueller, C., et al. (2023). Home office: Working from a private place.
[12] Fraile, J., et al. (2021). Evaluación formativa, autorregulación, feedback y herramientas digitales: Uso de socrative en educación superior.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

Recibido 23 Nov. 2025
Aceptado 24 Nov. 2025
ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025

Gamified Learning Ecosystems for Early Cognitive Development: Integrating EQ and IQ Through Digital Play-Based Interventions

Ecosistemas gamificados de aprendizaje para el desarrollo cognitivo temprano: Integrando EQ e IQ a través de intervenciones digitales basadas en juego

Brandon Alejandro Ponce Aragon [1]
brandon.ponce4668@alumnos.udg.mx

[1] Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara

Abstract. Traditional early education approaches, often fails to address a very important part of emotional (EQ) and intellectual intelligence (IQ), which is the holistic development of said concepts in young learners. This document presents a very comprehensive framework for gamified ecosystems that systematically and reliably integrate EQ and IQ development through evidence and data based digital interventions. Market Analysis shows the educational gaming sector will grow considerably from 6.89B to 10.7B by 2027, we examine how gamification principles can enhance cognitive development in children aged 4-12. Our research synthesizes Kolb's experiential learning theory with contemporary gamification strategies, analyzing a set of diverse learner personas and their developmental needs. I proposed and worked on a theoretical Gamified Cognitive Development Framework GCDF for short, that addresses the identified gap between traditional education and the growing demand for a comprehensive, tech-enabled learning solutions. While established frameworks like MDA (Hunicke et al., 2004) provide systematic approaches to game design and Flow theory (Csikszentmihalyi, 1990) explains optimal engagement states, neither addresses the systematic integration of cognitive and emotional development within culturally-adapted educational contexts. The framework uses measurable learning outcomes, adaptive game mechanics, and tailor-made learning paths that should cater to different learning styles and capabilities while maintaining educational rigor. Preliminary results based on a small set of data in Australian families with children varying from 2-16 years old children indicate that properly designed gamified interventions can indeed improve concept retaining, and complex concept learning while also develop critical thinking along with emotional regulation, and social skills essential to personal life success.

Keywords: Gamification, Cognitive Development, Educational Technology, Emotional Intelligence, Early Childhood Education.

Abstract. Los enfoques tradicionales de educación temprana frecuentemente no logran abordar una parte muy importante de la inteligencia emocional (EQ) e intelectual (IQ), que es el desarrollo holístico de dichos conceptos en estudiantes jóvenes. Este documento presenta un marco integral para ecosistemas gamificados que integran sistemática y confiablemente el desarrollo de IE y CI a través de intervenciones digitales basadas en evidencia y datos. El análisis de mercado muestra que el sector de juegos educativos crecerá considerablemente de 6.89 mil millones a 10.7 mil millones para 2027; examinamos cómo los principios de gamificación pueden mejorar el desarrollo cognitivo en niños de 4 a 12 años. Nuestra investigación sintetiza la teoría del aprendizaje experiencial de Kolb con estrategias contemporáneas de gamificación, analizando un conjunto de diversas personalidades de estudiantes y sus necesidades de desarrollo. Propuse y trabajé en un Marco Teórico de Desarrollo Cognitivo Gamificado (GCDF, por sus siglas en inglés), que aborda la brecha identificada entre la educación tradicional y la creciente demanda de soluciones de aprendizaje integrales habilitadas por tecnología. Aunque marcos establecidos como MDA (Hunicke et al., 2004) proporcionan enfoques sistemáticos al diseño de juegos y la teoría del Flujo (Csikszentmihalyi, 1990) explica los estados óptimos de compromiso, ninguno aborda la integración sistemática del desarrollo cognitivo y emocional dentro de contextos educativos adaptados culturalmente. El marco utiliza resultados de aprendizaje medibles, mecánicas de juego adaptativas y rutas de aprendizaje personalizadas que deben atender diferentes estilos de aprendizaje y capacidades mientras mantienen el rigor educativo. Los resultados preliminares basados en un pequeño conjunto de datos en familias australianas con niños de entre 2 y 16 años indican que las intervenciones gamificadas diseñadas adecuadamente pueden efectivamente mejorar la retención de conceptos y el aprendizaje de conceptos complejos, mientras también desarrollan pensamiento crítico junto con regulación emocional y habilidades sociales esenciales para el éxito en la vida personal.

Keywords: Gamificación, Desarrollo cognitivo, Tecnología Educacional, Inteligencia Emocional, Educación infantil temprana .

1 Introduction

The landscape of early education is transforming as technology reshape how our children are learning and developing cognitive and soft skills. Traditional education, while foundational, fails to address the holistic development needs of today's native digital learners, especially in the development of emotional intelligence (EQ) and intellectual quotient (IQ) or hard skills [1]. This gap is critical as research shows that early cognitive development significantly impacts academic and personal success as well as social-emotional well-being [2].

The global educational technology market, roughly valued at 142.37 billion in 2023 and set to grow at a compound annual growth rate of 13.4% from 2024 to 2030[3], reflects the growing recognition of EdTech which encompasses hardware and software technologies used to educate students virtually, enhancing classroom learning and improving educational outcomes. Within this expanding market, educational games that focus on EQ and IQ development as a mix represent a necessary addition to the market.

Contemporary research in cognitive development emphasizes the importance of integrated approaches that are able to address multiple developmental needs and domains [4]. However, most existing educational interventions focus primarily on either cognitive skills or emotional development rarely providing solutions that address both at the same time and are capable of doing so systematically.

2 Theoretical framework

2.1 Foundations of cognitive development

Early cognitive development encompasses multiple connected domains that help shape children's learning capacities and social-emotional skills. Research in developmental psychology demonstrate that periods between 1-9 represent a critical window to stablish foundational skills cognitive and emotional [5].

Hard skills (IQ) development. Traditional IQ education and training focuses on logical reasoning, problem solving, mathematical ability, and analytical thinking. However, contemporary educational approaches recognize that meaningful, contextual experiences that engage with multiple cognitive processes simultaneously further develop intellectual ability.

Emotional Intelligence Framework. Emotional intelligence, as conceptualized by Goleman and Bar-On, encompasses five core competencies: self-awareness, self-regulation, motivation, empathy, and social skills [7]. These competencies develop through social inter-action and experiential learning opportunities that allow children to practice emotional recognition, regulation, and expression in safe environments

2.2 Experiential learning theory in digital contexts

Kolb's experiential learning theory give us a very robust framework to understand how children acquire and integrate new knowledge through experiencing [8]. The four-stage cycle experience, reflective observation, abstract conceptualization, and active experimentation aligns naturally with game-based learning mechanism, especially the ones that encourage exploration, reflection and application.

These digital learning environments enhance traditional experiential learning by providing proper controlled spaces where children can engage and participate in repeated practice, thus receiving immediate feedback and explore consequences of decisions without real world risks but real-world learning. The alignment between experiential learning and gamification mechanics creates this extremely powerful opportunities for cognitive development [9].

2.3 Emerging technologies in educational gaming for 2025

A rapidly evolving 2025 tech landscape needs the integration of advanced technologies that operate withing the GCDF framework. Based on current market research, the metaverse gaming sector is projected to reach $168.4 billion by 2030, with educational applications representing a huge growth segment according to a very optimistic prediction [13][2].

Artificial intelligence and adaptive personalization. Contemporary AI implementations, particularly major private services like Amazon Personalize and similar machine learning platforms, enable real time content adaptation based on individual learners, including their behaviors and emotional states, where advanced machine learning models powered by Amazon Personalize could ensure that the platform can provide real-time, recommendations without requiring extensive data science expertise [14].

[2] Industry report from major gaming company "Gamefam"

Virtual and Augmented Reality (AR) integration. Technologies like VR/AR have demonstrated measurable impact on learning outcomes, with VR learners showing four times faster training completion in comparison with regular classroom training, four times more focus, almost four times emotional connection to content and more than double more connected than regular learners [15]. These technologies enable:

- Immersive emotional simulations for EQ development
- Three-dimensional puzzles for IQ enhancement
- Safe virtual environments for practicing social aspects of learning

2.4 Gamification principles for cognitive development

Implementing gamification requires careful integration of motivational elements with educational objectives. Research indicated that successful educational games incorporate progressive challenge systems, meaningful choice-based architectures, and social interaction opportunities that are capable of supporting both individual achievement and collaborative learning [10].

Progressive Challenge systems. Algorithms that create Adaptive difficulty systems, ensure that learning experiences are tailored to each child's zone of proximal development, providing an appropriate load while maintaining engagement and motivation.

Social Learning Integration. The Community of Inquiry model shows that meaningful learning happens through the intersection of 3 aspects: social presence, educational presence, and cognitive presence, all of which can be successfully implemented in digital gaming environments [11].

3 Market analysis and user requirements

3.1 Educational gaming market landscape

The educational gaming industry has presented a considerable growth. Specially driven by the recognition of certain markets that aim to enhance learning. Market analysis reveals key trends that inform us the design of effective development interventions.

Market Segmentation Analysis. The educational app market currently valued at $6.89 billion (2024) [12] shows clear segmentation based on age groups and learning objectives. For example, Pre-k education holds 8% of the market and is valued at $0.55 billion, K-12 dominates a 55% share and its valued at $3.76 billion and post-secondary amounts for 25% ($1.69B). This indicate us a strong market demand for early learning educational solutions.

3.2 Learner persona analysis

We identify seven distinct personas that represent different learning preferences and developmental needs. Each of which requires a tailor approach to maximize their individual engagement and a better learning outcome.

Table 1. Primary learner personas and their characteristics

Persona	Age/Range	Primary Interests	Learning Style	Key Motivators
Curious Explorer	4-8	Science, Nature	Hands-on, Interactive	Discovery, Experimentation
Problem Solver	6-10	Puzzles, Strategy	Analytical, Logical	Challenge, Achievement
Creative Thinker	5-10	Art, Music, Stories	Visual, Imaginative	Expression, Creation
Social Learner	7-12	Group Activities	Collaborative	Interaction, Cooperation
Achiever	6-12	Competition, Goals	Goal-oriented	Recognition, Progress
Active Learner	5-10	Physical Activity	Kinesthetic	Movement, Action
Tech Enthusiast	8-14	Technology, Coding	Experiential	Innovation, Building

This persona framework aims so that gamified learning systems accommodate diverse learning preferences while maintaining coherent educational objectives across all user types.

3.3 Parent and educator requirements

Analysis of stakeholder needs reveals critical requirements for successful implementation of gamified cognitive development systems. Parents prioritize safety, educational value, and measurable progress tracking, while educators emphasize curriculum alignment, classroom integration capabilities, and assessment tools.

Safety and Privacy Considerations. Compliance with global privacy regulations (COPPA, GDPR, PIPEDA) requires robust data protection measures and transparent privacy policies. Educational games must implement age-appropriate consent mechanisms and provide comprehensive parental controls.

Educational Effectiveness Metrics. Stakeholders require evidence-based assessment tools that demonstrate learning progress across both cognitive and emotional development domains. This necessitates integration of validated psychological assessment frameworks with game-based data collection systems.

4 Gamified cognitive development framework (GCDF)

4.1 Framework architecture

The Gamified Cognitive Development Framework (GCDF) integrates a set of theoretical foundations to create a comprehensive system for early education development. This framework operates across four interconnected dimensions or “pillars” as we call them: cognitive skill development, emotional intelligence, social interaction skills or social interaction facilitation and continuous assessment integration also known as follow-up.

System Architecture. The framework employs a very modular architecture that allows for proper customization based on individual learner needs and educational context. Core modules include assessment engines that tailors to the learner, adaptive content delivery systems, social interaction channels, and informative tracking dashboards.

4.2 Implementation methodology

Assessment and Personalization Engine. The Initial assessment protocols and algorithms evaluate each learner current cognitive and emotional status, using validated psychological instruments adapted to digital means without straying from holistic approaches. This helps create a baseline assessment which in turn is able to generate personalized learning paths and ongoing system adaptation mechanisms.

Adaptive Content Delivery. Machine learning algorithms analyze learner interaction patterns, performance metrics, and engagement indicators to continuously optimize content difficulty, presentation modality, and pacing. This ensures that each learner experiences appropriate challenge levels that promote flow states and sustained motivation.

Social Learning Integration. Collaborative features enable child to child interaction through structured and safe group activities, mentorship programs, and community challenges. These social elements support emotional intelligence development while providing opportunities for perspective-taking and empathy building.

4.3 Cultural adaptation and global implementation framework

The GCDF must accommodate diverse cultural values that strongly influence preferences for EQ and IQ development globally. Research indicates that cultural dimensions significantly impact educational technology adoption and effectiveness.

Cultural dimension integration. Based on Hofstede cultural dimensions theory [16], the framework could adapt to:

- Individualism-Collectivism. Individualistic cultures (US, Western Europe) prioritize both EQ and IQ development with emphasis on personal creativity, while collectivistic cultures like East Asia may initially prioritize IQ but increasingly recognize EQ importance for social harmony.
- Power distance. High power distance cultures may prioritize IQ development due to its association with social status, while lower power distance cultures could emphasize EQ for interpersonal skills development.
- Long-term orientation. Cultures with long-term orientation like East Asia mostly balance EQ and IQ development, strongly emphasizing perseverance and continuous learning

4.4 Measurement and evaluation framework

Multi-dimensional Assessment Approach. The framework employs comprehensive assessment strategies that evaluate cognitive development across multiple domains simultaneously. Traditional academic metrics are supplemented with emotional intelligence indicators, social competence measures, and creative problem-solving assessments.

Longitudinal Outcome Analysis. Long-term tracking capabilities support research into the sustained effects of gamified cognitive development interventions, providing evidence for educational policy development and intervention refinement.

5 Results and discusión

5.1 Prototype development and conceptual validation

During the prototyping period that culminated in June December 2023, a successful early conceptual prototype was built that implements the fundamental principles of the GCDF. This prototype demonstrated the technical and pedagogical feasibility of the proposed framework, although funding limitations prevented complete implementation and longitudinal evaluation.

Design Principles Validation. The prototype successfully incorporated key elements of the theoretical framework, including adaptive gamification mechanics, a set of integrated emotional assessment systems, and developmentally appropriate user interfaces. Initial focus group demonstrated high acceptance and understanding of core game concepts.

5.2 Framework integration and metaverse learning environments

The metaverse market roughly at 105.4 billion in 2024 and projected to reach 936.57 billion by 2030 [17], offered an unprecedented opportunity to integrate a complex framework like GCDF, providing immersive educational experiences that allowed us to anticipate a market with persistent virtual worlds where learning achievements could carry between focuses and worlds, safe collaborative spaces, virtual reality fields trips with a global culture perspective that would allow anyone in the world to think, and understand different perspectives. While not far from the path of developing a metaverse platform, the prototype where the GCDF framework was implemented still falls short to be considered a fully-fledged metaverse approach.

5.3 Market viability analysis

Demand Validation. The conducted market analysis confirms the existence of significant demand for solutions that integrate EQ and IQ development. Interviews with 100 parents with children aged 1-9 considered their kids reacted very positively to the introduction of the system, further showing that it's very important to have tools that develop cognitive and emotional skills specially in early stages of childhood.

Implementation Barrier Identification. The development process identified three main barriers for large-scale implementation: (1) initial funding requirements for complete development (estimated at $2.3M USD), (2) need for extensive clinical validation to meet educational standards, and (3) technological infrastructure challenges in Australian educational institutions.

Updated Competitive Analysis. Market research revealed that no current competitor offers a comprehensive solution that systematically combines EQ, IQ and holistic learning development with GCDF pedagogical principles. Existing products focus predominantly on a single development domain, validating the identified market opportunity.

6 Future directions and implications

6.1 Identified limitations and challenges

Methodological Limitations. The absence of complete implementation limits the ability to provide definitive empirical data on framework effectiveness. The presented projections are based on extrapolation from existing literature and preliminary prototype results, requiring rigorous experimental validation.

Implementation Challenges. Development identified several critical challenges: (1) the need for culturally adapted educational content for a global context, (2) extensive training requirements for educators, and (3) complex ethical considerations related to emotional data collection in child populations.

Funding Requirements. Complete GCDF implementation requires significant investment in software development, content creation, clinical validation, and technological infrastructure. Preliminary estimates suggest funding needs between $1.8-2.5M USD to achieve commercial viability.

Ethical AI and privacy considerations. The collection and processing of data, especially children require at least an anonymized by default approach along with a robust ethical framework that could include but not be limited to:

- Implementation of privacy by design or anonymity by design principles exceeding COPPA/GDPR requirements while still allowing for enough and relevant data collection so quality and quantifiable data is available to improve the framework.
- Algorithmic bias prevention through diverse training datasets.
- Transparency in AI processes that could be related to decision making in educational recommendations
- Very specific and tailor-made parental consent and control mechanisms for user interaction and data collection activities.

6.2 Lessons learned and framework refinement

Development Insights. The prototyping process revealed the critical importance of intuitive interfaces for 1-9-year-old users and the need for immediate feedback systems to maintain engagement. These findings allowed us to refine in GCDF design principles.

While a playable prototype is not publicly available, an early concept introductory video is accessible [18].

Cultural Considerations. Preliminary testing highlights the need to adapt game mechanics and narratives to fit a global context providing global cultural values rather than sticking to a single context, particularly in aspects related to family dynamics and authority structures in learning.

6.3 Technology improvement

The integration of AI generated content while on the development plan required more funding and time to really represent a relevant path changer in the trials. Future implementations aimed to include:

- NPCs (Non playable characters) that would adapt narratives and create assisted connections with users based on real time emotional assessment
- Predictive analytics to identify learning difficulties on the go

7 Conclusion

This research presents a comprehensive theoretical framework for integrating gamification principles with cognitive development theory and holistic learning approaches to address critical gaps in early childhood education. The Gamified Cognitive Development Framework (GCDF) provides a systematic approach for developing both emotional intelligence and intellectual capabilities through technology-enhanced learning experiences, though full empirical validation remains a priority for future work.

Key contributions include the synthesis of extensive market research insights with established pedagogical theory, development of evidence-based design principles for educational games, and successful demonstration of technical feasibility through prototype development and focus groups validations. The framework's modular architecture and adaptive capabilities show promise for customization across diverse learner populations and cultural contexts while maintaining educational rigor and effectiveness.

The prototype development phase, completed in December 2023, successfully validated core GCDF principles and demonstrated market demand for integrated EQ/IQ/Holistic development solutions. However, funding limitations prevented complete implementation and comprehensive empirical evaluation, highlighting the critical need for sustained investment in educational technology research and development.

Market analysis confirms significant demand for comprehensive cognitive development solutions, with 70% of surveyed parents and educators expressing strong interest in tools that simultaneously address emotional and intellectual development. The identified market opportunity, estimated at $1.7-3.2 billion globally, validates the commercial potential of GCDF-based solutions.

Future research priorities include securing funding for complete system implementation, conducting rigorous empirical validation through randomized controlled trials and global support of educational entities, and performing cross-cultural adaptation studies. The successful completion of these research phases will provide the evidence base necessary for widespread educational adoption and policy integration.

The implications of this work extend beyond individual learning outcomes to encompass educational policy development, teacher preparation programs, and educational technology industry standards. By providing a bridge between educational theory and practical implementation, this research establishes foundational principles for the evolution of early childhood education toward more effective, engaging, and comprehensive approaches to cognitive development.

While the complete realization of GCDF's potential awaits further funding and development, the theoretical framework and preliminary validation presented here contribute significantly to understanding how gamification can systematically enhance early childhood cognitive development. I believe that this work provides essential guidance for researchers, educators, and policymakers seeking to leverage technology for improved educational outcomes in the digital age.

References

1. Gardner, H.: Multiple Intelligences: New Horizons in Theory and Practice. Basic Books, New York (2006)
2. Shonkoff, J.P., Phillips, D.A.: From Neurons to Neighborhoods: The Science of Early Childhood Development. National Academy Press, Washington DC (2000)
3. Education technology market size: Industry report, 2030. Education Technology Market Size | Industry Report, 2030. (n.d.). https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/education-technology-market
4. Diamond, A.: Executive Functions. Annual Review of Psychology 64, 135-168 (2013)
5. Piaget, J.: The Psychology of the Child. Basic Books, New York (1969)
6. Vygotsky, L.S.: Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes. Harvard University Press, Cambridge (1978)
7. Goleman, D.: Emotional Intelligence: Why It Matters More Than IQ. Bantam Books, New York (1995)
8. Kolb, D.A.: Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development. Prentice Hall, New Jersey (1984)
9. Gee, J.P.: What Video Games Have to Teach Us About Learning and Literacy. Palgrave Macmillan, New York (2003)
10. Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., Nacke, L.: From Game Design Elements to Gamefulness. In: Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference, pp. 9-15. ACM, New York (2011)

11. Garrison, D.R., Anderson, T., Archer, W.: Critical Inquiry in a Text-Based Environment. The Internet and Higher Education 2(2-3), 87-105 (2000)
12. Statista: Global Education Apps Market Size from 2017 to 2027. https://www.statista.com/outlook/amo/app/education/worldwide, last accessed 2024/01/15
13. Garfinkle, A. (2024, December 19). *Gamefam Industry Report Gamefam. "State of Brands on Roblox and Fortnite: Second Annual Report." December 2024.* Fortune. https://fortune.com/2024/12/19/by-2030-the-metaverse-gaming-market-will-reach-168-4-billion-estimates-startup-gamefam/
14. Recommender system, recommendation engine - amazon personalize - AWS. (n.d.). https://aws.amazon.com/personalize/
15. PricewaterhouseCoopers. (n.d.). *PWC's study into the effectiveness of VR for soft skills training*. PwC. https://www.pwc.co.uk/services/technology/immersive-technologies/study-into-vr-training-effectiveness.html
16. Hofstede, G. H., & Hofstede, G. J. (2011). *Cultures and organizations: Software of the mind*. McGraw Hill Professional.
17. *Metaverse market size and share: Industry Report, 2030*. Metaverse Market Size And Share | Industry Report, 2030. (n.d.). https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metaverse-market-report
18. Google. (n.d.). *[redacted]landfinal.mp4*. Google Drive. https://drive.google.com/file/d/1KkA0SjNyZ88rI-LyrjZdFpKyF_ZkBxi_u/view?usp=sharing
19. *Global Education's tech reboot*. Morgan Stanley. (n.d.). https://www.morganstanley.com/ideas/education-system-technology-reboot
20. Hatami, H., Hazan, E., Khan, H., & Rants, K. (2023, January 24). *A CEO's guide to the metaverse*. McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/capabilities/growth-marketing-and-sales/our-insights/a-ceos-guide-to-the-metaverse

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Recibido 23 Nov. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*
Aceptado 24 Nov. 2025

Gamificación y emprendimiento en Gastronomía: experiencia educativa con retos *Shark Tank* en el ITSX

Gamification and entrepreneurship in gastronomy: educational experience with Shark Tank challenges at ITSX

Cynthia Judith Sánchez Martínez[1]

Virginia Lagunes Barradas[1,2]
virginia.lb@xalapa.tecnm.mx

Lilia Licea Hernández[1]

Erika María Ronquillo Mandujano[1]

Rosalía Daza Merino[1]

Margarita del Carmen Torres Morales[1]

[1] TECNM/Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, Veracruz, México.
[2] Facultad de Estadística e Informática, Universidad Veracruzana, México.

Resumen. La gamificación se ha consolidado como una metodología emergente con gran potencial en la educación superior, especialmente en áreas técnicas, al incorporar dinámicas propias del juego para fortalecer la motivación, el compromiso y el aprendizaje activo del estudiantado. No obstante, su implementación representa desafíos importantes, como el diseño de experiencias atractivas y el aseguramiento de condiciones tecnológicas y humanas adecuadas. En este contexto, el presente artículo propone una metodología gamificada basada en retos al estilo *Shark Tank*, que, tras el análisis de teorías del juego, se aplicó a cursos universitarios de gastronomía, con el objetivo de fomentar el emprendimiento, el pensamiento crítico y el desarrollo de habilidades blandas. A través de la simulación de entornos reales de inversión, los estudiantes elaboran propuestas, presentan sus ideas ante un jurado y reciben retroalimentación inmediata, lo que promueve una experiencia de aprendizaje significativa. La metodología desarrollada incluye fases como la generación de ideas, la validación técnica y financiera, y la exposición del proyecto final, permitiendo además una evaluación integral mediante indicadores centrados en motivación, desempeño académico y percepción estudiantil. Los resultados sugieren que la integración de este tipo de dinámicas favorece el compromiso y el aprendizaje técnico, a la vez que fortalece competencias transversales clave para el ejercicio profesional. Esta propuesta representa una alternativa replicable y adaptable para otras áreas disciplinares interesadas en integrar el emprendimiento como eje formativo.

Abstract. Gamification has established itself as an emerging methodology with great potential in higher education, especially in technical areas, by incorporating game dynamics to strengthen student motivation, engagement, and active learning. However, its implementation poses significant challenges, such as designing engaging experiences and ensuring adequate technological and human conditions. In this context, this article proposes a gamified methodology based on Shark Tank-style challenges, which, after analyzing game theories, was applied to university gastronomy courses with the aim of promoting entrepreneurship, critical thinking, and the development of soft skills. Through the simulation of real investment environments, students develop proposals, present their ideas to a jury, and receive immediate feedback, promoting a meaningful learning experience. The methodology developed includes phases such as idea generation, technical and financial validation, and presentation of the final project, also allowing for comprehensive evaluation using indicators focused on motivation, academic performance, and student perception. The results suggest that integrating this type of dynamic promotes commitment and technical learning, while strengthening key cross-cutting skills for professional practice. This proposal represents a replicable and adaptable alternative for other disciplinary areas interested in integrating entrepreneurship as a training focus.

Palabras clave: Metodologías de gamificación, Retos de emprendimiento, Habilidades blandas.

Keywords: Gamification methodologies, Entrepreneurship challenges, Soft skills.

1. Introducción

La gamificación, es una metodología emergente que consiste en utilizar juegos o mecánicas de juego en contextos no lúdicos, proporcionando en educación la motivación de los alumnos (Parra & Segura, 2019). Generalmente, se utiliza para influenciar el comportamiento o la actitud de los estudiantes, aumentando el compromiso con su propio aprendizaje. Para lograrlo, acude a la definición de reglas, tareas de seguimiento y la retroalimentación positiva. Su uso en la práctica docente ha ganado relevancia en instituciones de educación superior, especialmente en áreas técnicas como la ingeniería.

Lee y Hammer (2011, como se citó en Lozada & Betancur, 2017) argumentan que en la gamificación deben verse reflejados dos factores clave. Por un lado, la motivación que lo lleve a la exploración activa y a la generación de sensaciones tanto de orgullo como de frustración; como en segunda instancia, el compromiso, establecido a partir del seguimiento de reglas y de la ejecución del rol que les toque asumir.

Adicionalmente, Csikszentmihalyi (1975, como se citó en Catalán y Martínez, 2018). encontró que existen grupos de personas que realizan actividades específicas por el elevado grado de diversión y realización personal que encontraban en ellas, categorizándolas como intrínsecamente motivadoras y a la experiencia óptima resultante de las mismas, como "flow".

Sin embargo, implementar la gamificación en educación superior trae dos retos: 1) crear un ambiente educativo en el que los estudiantes se interesen por interactuar voluntariamente con las actividades gamificadas; y 2) contar con una infraestructura tecnológica y un equipo de trabajo que permitan la implementación de las actividades gamificadas (Ardila, 2019).

Asimismo, debe contarse con docentes creativos, capaces no sólo de diseñar las experiencias de jugabilidad, sino de disfrutarlas de manera solidaria con sus estudiantes y aún más, aptos para evaluar el impacto positivo o negativo en la motivación, interés y desempeño académico de los estudiantes. Por lo tanto, es importante desarrollar una metodología replicable que permita definir objetivos y efectos en la implementación de diseñar una estrategia de enseñanza-aprendizaje basada en gamificación con fines de emprendimiento. Una manera de construir o verificar dichos objetivos, consiste en contar con indicadores que sirvan para proporcionar información clave que permite medir el progreso, el rendimiento y el logro de objetivos, tal y como lo sugiere Lozada & Betancur (2017) tras realizar una revisión sistemática de la gamificación en la educación superior.

La aplicación de la gamificación a nivel universitario es una estrategia con la capacidad de generar mejoras importantes en la experiencia educativa del estudiante (Cordero et al., 2024). De manera específica, los retos al estilo *Shark Tank*, herramienta que compete a esta investigación, representan una estrategia pedagógica innovadora en donde los alumnos desarrollan proyectos reales, presentan sus propuestas ante un jurado, profesores o profesionales, y reciben retroalimentación inmediata, lo cual emula entornos de emprendimiento y mejora el compromiso académico.

En este artículo se proponen una serie de pasos que conforman una metodología para integrar los retos *Shark Tank* en cursos de gastronomía, promoviendo el emprendimiento en diversas áreas y evaluando sus efectos en la motivación, aprendizaje técnico y habilidades blandas de los estudiantes.

2. Metodología

Shark Tank o su versión británica *Dragons´Den* son dos populares programas de televisión donde empresarios y emprendedores presentan sus ideas y proyectos ante un panel de inversionistas exitosos, conocidos como los "tiburones o *sharks*" (o los dragones). Estos inversionistas analizan los proyectos y deciden si invertir o no en ellos (Principal, 2024).

Para su utilización en el Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, se diseñó una intervención basada en gamificación estructurada mediante retos *Shark Tank*, aplicada en la materia El Emprendedor y la Innovación de la Licenciatura en Gastronomía. Las etapas para realizar ambientes de aprendizaje gamificados se caracterizan por analizar el contexto de la población objetivo; identificar los objetivos y rutas de aprendizaje; establecer las tareas individuales y colectivas; definir las recompensas a otorgar y brindar la posibilidad de repetir actividades. Dichas etapas se muestran a continuación:

2.1. Análisis del contexto de la población objetivo

Los estudiantes de gastronomía deben hacer uso de diversas disciplinas, ya que se encuentran siempre en un proceso de transformación o cambio en donde no existe una conceptualización o perspectiva consolidada para su estudio, dado que la gastronomía surge y evoluciona a la par de los contextos sociales en los que está inmersa (Kesimoglu, 2015, como se citó en Reyes, Guerra y Quintero, 2021).

La materia antes citada se encuentra en el quinto semestre de la carrera por lo que los estudiantes ya poseen diversas bases sobre gastronomía, economía empresarial y mercadotecnia, entre otras.

2.2 Identificación de los objetivos y rutas de aprendizaje

El objetivo siguiente combina el aporte de la asignatura con la intención didáctica de la técnica *Shark Tank*, es decir, el reto implica desarrollar el espíritu emprendedor ético en los estudiantes, mediante la generación y gestión de ideas de negocio innovadoras, factibles y sustentables que impacten positivamente en su entorno social, económico y ambiental (Tecnológico Nacional de México, 2021). Para ello, se propone el análisis del pensamiento creativo y el uso de herramientas intelectuales orientadas a la identificación de oportunidades, resolución de problemas y diseño de soluciones empresariales, implementando retos tipo *Shark Tank* como estrategia pedagógica para fortalecer habilidades de comunicación, negociación, argumentación y validación de proyectos tanto de manera individual como colectiva.

La ruta de aprendizaje (véase figura 1) diseñada para llevar a cabo este reto didáctico, es la siguiente:

Fig. 1. Ruta de aprendizaje para implementar Shark Tank como estrategia didáctica en la materia de El Emprendedor y la Innovación de la Licenciatura en Gastronomía en el ITSX.

1. Lluvia de ideas para la generación de ideas creativas

Este paso es fundamental en la etapa inicial del emprendimiento, donde los participantes generan ideas de productos o servicios innovadores. En *Shark Tank*, los emprendedores exitosos presentan ideas originales que responden a una necesidad del mercado o que mejoran una solución existente. La creatividad es clave para diferenciarse de la competencia y captar el interés de los inversionistas.

2. Investigación del proceso

Los estudiantes deben prepararse para presentar cómo se ha desarrollado el producto o servicio y qué tan viable es técnicamente. Por ello, es crucial investigar el proceso productivo, normativo, logístico o de servicio. Aquellos que no dominan su proceso suelen ser rechazados para la presentación ante los evaluadores. Investigar a fondo demuestra preparación, compromiso y conocimiento del negocio.

3. Desarrollo del concepto

Este paso convierte la idea inicial en una propuesta concreta con características definidas (nombre, público objetivo y valor agregado, entre otras). En *Shark Tank*, el concepto debe estar claro, ser entendible y tener un modelo de negocio bien planteado para captar el interés de los inversionistas.

4. Pruebas de diseño de producto

Tener un prototipo funcional o haber realizado pruebas del producto le da un valor agregado. Muchos inversionistas valoran cuando los emprendedores ya han probado su idea en el mercado, han obtenido retroalimentación y han hecho mejoras. Esto refleja compromiso y menor riesgo.

5. Cálculo de proyecciones numéricas

Los *sharks* siempre preguntan por costos, ganancias, márgenes de utilidad, puntos de equilibrio y retorno de inversión. Sin proyecciones numéricas claras, los proyectos pierden credibilidad. Este paso permite estimar el potencial económico de la idea y preparar argumentos sólidos para defender el proyecto.

6. Preparación del Pitch

Aplicar técnicas de manejo de estrés, y expresión oral para poder comunicar efectivamente el proyecto a los *sharks*. Los estudiantes deben de preparar con tiempo el Pitch y ensayarlo para incluir toda la información importante, desde el nacimiento de la idea, y, sobre todo, sus proyecciones financieras, así como dar una prueba de lo que ofertan.

7. Presentación del proyecto ante Tiburones (Jueces)

Con un proyecto y un Pitch bien estructurado, los estudiantes se enfrentan a cuatro tiburones (jueces) que, en un aspecto lúdico, llegan a cuestionar a los jóvenes con preguntas sobre el proyecto, desde una visión experta en el tema, son los encargados de poner en duda o de sorprenderse con las ideas y la ejecución de los estudiantes.

2.2. Establecimiento de tareas individuales y colectivas

Algunas de las actividades recomendadas (véase Tabla 1), tanto individuales como grupales para cada fase, se mencionan en este apartado, cada equipo tiene la libertad de llevar a cabo las necesarias para llegar al fin deseado.

Tabla 1. Actividades individuales y grupales para cada fase del reto *Shark Tank*.

Fase	Individuales	Grupales
Lluvia de ideas para la generación de ideas creativas	• Generar al menos 3 ideas personales basadas en problemas reales. • Investigar brevemente la existencia de productos similares. Reflexionar sobre intereses y habilidades personales que se pueden aplicar al emprendimiento.	• Realizar una sesión de lluvia de ideas y debatir sobre las propuestas. • Elegir democráticamente la idea con mayor potencial. Justificar la elección con base en criterios como innovación, impacto y viabilidad.
Investigación del proceso	• Buscar información sobre el sector o industria relacionada con la idea elegida. • Investigar normativas o procesos clave relacionados con la producción o prestación del servicio. Analizar al menos un caso de éxito o fracaso similar.	• Integrar y sistematizar la información investigada. • Identificar retos técnicos, logísticos o legales del proyecto. Elaborar un mapa del proceso general del producto o servicio.
Desarrollo del concepto	• Redactar una descripción del producto desde una perspectiva personal. • Proponer un nombre y eslogan para la marca. Plantear cuál sería su ventaja competitiva.	• Unificar la identidad del proyecto (nombre, logo, propósito). • Redactar la propuesta de valor y el modelo de negocio básico (Canvas o similar). Simular un elevator pitch en video o presentación.
Pruebas de diseño de producto	• Investigar materiales, tecnologías o métodos necesarios para hacer un prototipo.	• Desarrollar el prototipo funcional o presentación gráfica.

	• Diseñar un boceto o maqueta en papel o digital (según perfil técnico del estudiante). Proponer criterios de evaluación del prototipo.	• Aplicar una prueba piloto o simulación del uso del producto. Recopilar retroalimentación de usuarios simulados o reales.
Cálculo de proyecciones numéricas	• Estimar costos individuales del producto o servicio (materiales, mano de obra, tiempo). • Investigar precios de productos similares. Calcular el punto de equilibrio básico.	• Elaborar un plan financiero básico: inversión inicial, costos operativos, ingresos esperados. • Definir el precio de venta con base en análisis de mercado y rentabilidad. Preparar gráficas o tablas para mostrar datos financieros en el pitch final.
Preparación del pitch	• Redactar y practicar su parte del discurso según el rol asignado (CEO, CTO, CFO, etc.). • Ensayar postura, tono de voz y manejo de preguntas difíciles. Elaborar una diapositiva del pitch.	• Coordinar la presentación final estilo *Shark Tank*. • Simular una ronda de preguntas con otros equipos o docentes. Ajustar el guion y la narrativa de forma coherente y persuasiva.

En la gamificación aplicada, caso *Shark Tank*, los estudiantes forman equipos, desarrollan propuestas y presentan soluciones ante un jurado simulado.

3. Resultados

Como resultado de la implementación de la técnica Shark Tank en el contexto educativo, se observó una alta participación y compromiso por parte de los estudiantes, quienes desarrollaron propuestas emprendedoras innovadoras adaptadas a su área de formación. En los siguientes apartados se visualiza la dinámica que permitió que los estudiantes aplicaran de forma práctica los conocimientos adquiridos, además de fortalecer habilidades blandas como la comunicación efectiva, el trabajo en equipo y la toma de decisiones bajo presión. Finalmente, la retroalimentación proporcionada por los jueces (tiburones) enriqueció la experiencia al ofrecer una visión crítica y profesional sobre la viabilidad de los proyectos, lo que generó un aprendizaje significativo orientado al mundo real del emprendimiento.

3.1. Simulación de la técnica *Shark Tank*

La técnica tipo *Shark Tank*, basada en la simulación de presentación de proyectos ante un panel de "inversionistas" o expertos, es una estrategia pedagógica poderosa que promueve el desarrollo de habilidades transversales y específicas relacionadas con el emprendimiento.
Para el día del evento, se invitaron a cuatro jueces o “tiburones” (véase Figura 2), que serán los encargados de evaluar los proyectos. Estas personas son en el caso de los alumnos de Gastronomía, empresarios exitosos en el ámbito gastronómico local, que con su caso de éxito, cuentan con la experiencia para evaluar, pero a la vez aconsejar a los estudiantes en sus proyectos. Es importante aclarar que el evento es con un fin lúdico, ya que los jueces no financiarán los proyectos, solamente juegan con los estudiantes para definir a un equipo ganador.

Fig. 2. Jueces o tiburones que evalúan la creatividad e innovación.

A los jueces se les entregaron fichas con las rúbricas de evaluación que al final del evento se sumaron para elegir al equipo finalista.

3.2. Rúbricas de evaluación

La siguiente rúbrica de evaluación (Véase Tabla 2) tiene como propósito valorar de manera objetiva e integral el desempeño de los estudiantes durante la presentación de sus proyectos emprendedores, en el marco de la estrategia didáctica basada en la técnica *Shark Tank*. Esta herramienta permite medir el desarrollo de competencias clave como la creatividad, el dominio del pitch, así como la capacidad de análisis financiero y trabajo colaborativo, entre otros.

Tabla 2. Criterios de evaluación por parte de los tiburones

Nombre del equipo	Criterios	Puntos (100 en total)
	Creatividad e Innovación del Proyecto	30 puntos
	Presentación del Producto o Servicio	30 puntos
	Conocimientos financieros del Proyecto	20 puntos
	Seguridad, Presentación y Pitch de los integrantes del equipo	20 puntos

La aplicación de esta rúbrica permitió evaluar no solo los productos finales de los proyectos presentados, sino también una serie de aspectos clave relacionados con el proceso de aprendizaje. En términos de motivación y compromiso, los estudiantes del grupo gamificado mostraron una participación activa y persistente, motivados en gran parte por las recompensas previamente anunciadas para el equipo ganador. Respecto al desempeño académico, se evidenció una mejora notable en áreas transversales como Costos, Mercadotecnia, Diseño del Producto y Fundamentos de Gestión Estratégica, reflejando una apropiación significativa de conocimientos aplicados al proyecto. En cuanto a las habilidades blandas, se observó un fortalecimiento del trabajo en equipo, la comunicación efectiva y el pensamiento crítico y divergente, impulsado por la dinámica de competencia y la exposición ante jueces. Finalmente, desde la percepción estudiantil, la mayoría manifestó preferencia por el formato de reto frente a las clases tradicionales; no obstante, también se señalaron aspectos a mejorar como la presión generada por la competencia y la presencia de evaluadores externos, así como algunos conflictos de comunicación dentro de los equipos.

4. Conclusiones

A partir del análisis de los resultados obtenidos durante la implementación de la estrategia pedagógica basada en la técnica Shark Tank, es posible extraer diversas conclusiones que permiten valorar el impacto de esta metodología en el proceso formativo de los estudiantes. Las conclusiones que se presentan a continuación sintetizan los principales hallazgos en términos de motivación, desempeño académico, desarrollo de competencias y percepción de los participantes, aportando elementos clave para la reflexión sobre el uso de dinámicas gamificadas en contextos de educación superior, particularmente en programas orientados al emprendimiento y la innovación.

4.1. Implementación del reto *Shark Tank*

Constituye una estrategia efectiva de gamificación, alineada con expectativas de la educación del siglo XXI. La combinación de motivación, aprendizaje técnico y habilidades interpersonales favorece una formación integral. No obstante, el diseño requiere equilibrar la motivación extrínseca con el aprendizaje profundo, reforzar el soporte técnico mediante las asesorías del(la) docente y de los inversionistas simulados, así como cuidar el bienestar emocional. Recomendamos extender esta estrategia con iteraciones continuas y formación docente en diseño de experiencias lúdicas. Futuros estudios tenderán a investigar su aplicación en otras carreras o disciplinas.

4.2 Presentación del producto

Los estudiantes elaboraron propuestas, productos o servicios, usando diversos insumos, herramientas tecnológicas y creatividad. Dichas presentaciones representan la capacidad de materializar ideas abstractas y hacerlas tangibles, así como validar su propuesta con posibles usuarios o clientes.

4.3 Asistencia a asesorías

Los alumnos participaron en sesiones de mentoría o asesorías académicas, recibiendo retroalimentación para mejorar su propuesta. Estas asesorías se llevan a cabo con el(la) docente de la materia en un mes previo a la presentación con los inversionistas simulados. Refleja compromiso, apertura al aprendizaje y mejora continua. También indica el aprovechamiento de los recursos académicos disponibles para el éxito del proyecto.

4.4 Pitch

Cada equipo presentó su propuesta en un formato tipo *Shark Tank* frente a un jurado (véase figura 3). Se evaluaron aspectos como claridad, argumentación, dominio del tema y persuasión. Esta actividad desarrolló habilidades de comunicación efectiva, liderazgo, seguridad personal y capacidad para responder bajo presión, fundamentales en el ámbito profesional.

Fig. 3. Presentación del producto o servicio a los jurados.

4.5 Rúbrica del jurado

La evaluación final se realizó con una rúbrica estructurada que consideró criterios o indicadores como: Creatividad e innovación del proyecto, presentación del producto o servicio, conocimientos financieros del proyecto y seguridad, presentación y pitch de los integrantes del equipo. Esta rúbrica proporciona un marco transparente y justo de evaluación, además de ofrecer insumos valiosos para la retroalimentación formativa. Más allá de aprobar, se evidencia un aprendizaje significativo y aplicado, cumpliendo con los objetivos formativos de la materia mediante el uso de metodologías activas como aprendizaje basado en proyectos y gamificación.

4.6 Recompensas

Previamente se gestionó como recompensa a los estudiantes, patrocinios reales como cenas o apoyos de negocios locales, como parte de la validación de su idea. El(la) docente por su parte (véase Figura 4), los gestionó a manera de premio para el ganador. Esta actividad permitió aplicar habilidades de negociación, persuasión y relaciones públicas, además de fortalecer la conexión con el entorno social y económico al conseguir que restaurantes de la localidad participaran como patrocinadores.

Fig. 4. Actores involucrados en la gestión de recompensas.

En versiones futuras, la ejecución del proyecto Shark Tec del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, podría adaptarse a las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), materializándose mediante actividades concretas que fortalezcan su gestión y resultados. En primer lugar, el uso de plataformas digitales de gestión de proyectos, como Trello o Notion, permitiría planificar tareas, asignar responsables y monitorear avances de manera colaborativa. Asimismo, la implementación de canales de comunicación en línea, a través de Teams puede favorecer la interacción sincrónica y asincrónica entre estudiantes y docentes, garantizando continuidad en el trabajo. Para el desarrollo técnico, la integración de software especializado, tanto de simulación como de análisis de datos, posibilitaría la creación de prototipos virtuales y el procesamiento de información relevante. De manera complementaria, la creación de espacios digitales de difusión —sitio web, blog o redes sociales académicas— posibilita el fortalecimiento de la visibilidad del proyecto y promueve la vinculación con la comunidad científica y social. Finalmente, el empleo de aulas virtuales y repositorios académicos facilitaría la capacitación interna y el acceso a fuentes científicas actualizadas, consolidando la dimensión investigativa de Shark Tec.

References

1. Catalán, S., & Martínez, E. (2018). *Favorecer el "estado de flow": la clave de los juegos de simulación empresarial*. Journal of Management and Business Education, 1(2), 140-159. https://doi.org/10.35564/jmbe.2018.0011
2. Cordero P. L. F. (2025). Gamificación en educación superior como herramienta tecnológica en el proceso de aprendizaje. Redilat.org. https://latam.redilat.org/index.php/lt/article/view/2290/2890
3. Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. (2024). Retícula: Alta Dirección en Restaurantes y Hoteles [PDF]. https://www.itsx.edu.mx/downloads/reticulas/2024/GAST_Alta_Direccion_en_Restaurantes_y_Hoteles.pdf
4. Lozada A. C., & Betancur G. S. (2017). La gamificación en la educación superior: una revisión sistemática*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *16*(31), 97–124. https://www.redalyc.org/journal/750/75055115006/html/
5. Parra, E., & Robles, A. S. (2019). Producción científica sobre gamificación en educación: un análisis cienciométrico. *Revista de Educación*, *386*, 113–136. https://dialnet.unirioja.es/servlet/dcart?info=link&codigo=7464667&orden=0
6. Principal. (2024). *Lecciones de Shark Tank para emprendedores*. https://principal.com.mx/blog/emprendedores/lecciones-de-shark-tank-para-emprendedores
7. Reyes Uribe, A. C., Guerra Avalos, E. A., Quintero Villa, J. M. (2017). Educación en gastronomía: su vínculo con la identidad cultural y el turismo. *El Periplo Sustentable*, *32*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-90362017000100009&script=sci_arttext
8. Tecnológico Nacional de México. (2021). Alta dirección en restaurantes y hoteles (AED-1072). https://www.apizaco.tecnm.mx/wp-content/uploads/2021/12/AED1072.pdf

NOTAS BIOGRÁFICAS:

Cynthia Judith Sánchez Martínez.

Virginia Lagunes Barradas. Egresada de la Licenciatura en Informática por la Universidad Veracruzana, cuenta con una Maestría en Ciencias Computacionales por la Fundación Rosenblueth y una Maestría en Docencia Universitaria por la Universidad de Xalapa, así como un Doctorado en Educación por la Escuela Libre de Ciencias Políticas y Administración Pública. Con más de dos décadas dedicadas a la formación de ingenieros, se desempeña como académica de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, en la Maestría y la Ingeniería en Sistemas Computacionales. Asimismo, es docente en la Facultad de Informática de la Universidad Veracruzana. Perfil PRODEP desde 2016, miembro activo de IEEE y Women in Engineering (WIE), e integrante del Padrón Veracruzano de Investigadores (PVI). Posee diplomados en Redes de Computadoras, Habilidades del Pensamiento Crítico y Creativo, Tecnologías de la Información y Comunicación para el Aprendizaje y Ciencia de Datos, además de diversas certificaciones nacionales en estándares de competencia. Sus líneas actuales de interés se centran en la gestión de proyectos ágiles bajo metodologías Lean y SCRUM, así como en proyectos de Ciencia de Datos e Inteligencia Artificial aplicada a la educación.

Lilia Licea Hernández. Egresada de la Licenciatura en Contaduría por la Universidad Veracruzana, la maestría en Psicología Organizacional por el Instituto de Estudios Universitarios, A.C., así como un doctorado en Educación por el Centro Veracruzano de Investigación y Posgrado. Con más dos décadas dedicadas a la formación de ingenieros, se desempeña como académica de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. Perfil PRODEP desde 2021. Posee diplomados en Educación Financiera, en Recursos Educativos en Ambientes Virtuales de Aprendizaje, en Seguros, en Tutorías, en Educación Inclusiva, en Economía Social, en Integración de Inteligencia Artificial en escenarios de aprendizaje. Sus líneas actuales de interés se centran en proyectos de desarrollo sustentable y gestión desarrollo empresarial

Erika María Ronquillo Mandujano. Egresada de la Licenciatura en contaduría por la Universidad Veracruzana, cuenta con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Administrativa. Con más de dos décadas dedicadas a la formación de ingenieros, se desempeña como académica de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, en las carreras de Ingeniería en Gestión Empresarial y Bioquímica. Perfil PRODEP desde 2022. Posee diplomados en Economía social y Solidaria, Seguros, Educación Financiera, en Formación de Tutores y en Integración de Inteligencia Artificial en Escenarios de Aprendizaje. Sus líneas actuales de interés se centran en planes de negocios y análisis financieros, así como en proyectos de desarrollo sustentable y gestión y desarrollo empresarial.

Rosalía Daza Merino. Ingeniera Industrial con Maestría en Ciencias en Ingeniería Administrativa, con una trayectoria de más de veinticinco años como docente en el Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, dentro del programa educativo de Ingeniería Industrial. A lo largo de su formación profesional ha complementado sus estudios con diplomados en Formación Docente, Formación de Gestores en la Innovación, Gerencia de Proyectos, Seguridad Industrial, Agua Limpia y Saneamiento, y Pensamiento Crítico para la Educación Tecnológica. Ha colaborado en los sectores gubernamental e industrial, orientando su labor académica y de investigación hacia las líneas de Desarrollo Sustentable, Sistemas de Automatización, Diseño y Mejora de Procesos y Productos, y Tecnologías de la Información y la Comunicación. Actualmente es miembro del Padrón Veracruzano de Investigadores y cuenta con registro vigente en el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) 2025.

Margarita del Carmen Torres Morales. Licenciada en Administración de Empresas. Docente de la carrera de ingeniería en gestión empresarial e ingeniería industrial me especializo en el diseño organizacional y las metodologías de mejora de procesos y calidad. Sus intereses se enfocan en el ámbito de determinación y mejora de procesos, así como de la viabilidad económica y técnica de los proyectos a desarrollar.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

LUDICON
Recibido 23 Nov. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*
Aceptado 24 Nov. 2025

Lecciones Aprendidas de la Literatura: Buenas Prácticas en el Diseño de Mecánicas para Diferentes Géneros de Videojuegos

Lessons Learned from the Literature: Best Practices in Designing Mechanics for Different Video Game Genres

David Bonilla Carranza[1]
jose.bcarranza@academicos.udg.mx
Jose Esteban Hernandez De Leon [2]
jose.hernandez8793@academicos.udg.mx
Veronica Camacho Santillan[1]
veronica.csantillan@academicos.udg.mx
Erendira Alvarez Tostado Martinez[3]
altoera@valles.udg.mx
Erick Jorge Roberto Guerrero Muñoz[3]
erickg@valles.udg.mx

[1] Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
[2] Universidad de Guadalajara, Centro Universitario De Ciencias De La Salud
[3] Universidad de Guadalajara, Centro Universitario De Los Valles

Resumen. El presente artículo realiza un mapeo sistemático de la literatura sobre diseño de mecánicas de videojuegos, con el objetivo de identificar las buenas prácticas más recurrentes y efectivas aplicadas en distintos géneros. A partir del análisis de fuentes académicas y profesionales, se destacan los aportes de marcos teóricos como MDA (Mechanics, Dynamics and Aesthetics), el Tetrad de Schell, y propuestas recientes centradas en la experiencia del jugador. El estudio organiza las lecciones aprendidas según los principales géneros (plataformas, puzzles, RPG, estrategia, acción-aventura, entre otros), señalando patrones comunes y recomendaciones específicas. Entre los hallazgos principales se encuentran la importancia de diseñar mecánicas centrales claras, promover elecciones significativas, balancear riesgo-recompensa, y adaptar la progresión y feedback según el perfil del jugador. Finalmente, se ofrece una síntesis de buenas prácticas transversales que sirven como guía para diseñadores, así como un panorama de vacíos en la literatura que pueden orientar futuras investigaciones.

Palabras clave: Diseño de Mecánicas de Juego, Mecánicas Dinámicas Estéticas, Balance de juego, Progresión del jugador, Mapas de literatura

Abstract. This article presents a systematic mapping of the literature on video game mechanics design, with the aim of identifying the most recurrent and effective best practices applied across different genres. Based on the analysis of academic and professional sources, the contributions of theoretical frameworks such as MDA (Mechanics, Dynamics, and Aesthetics), the Schell's Tetrad, and recent proposals focused on player experience are highlighted. The study organizes the lessons learned according to major genres (platformers, puzzles, RPGs, strategy, action-adventure, among others), identifying common patterns and specific recommendations. Among the main findings are the importance of designing clear core mechanics, promoting meaningful choices, balancing risk and reward, and adapting progression and feedback according to player profiles. Finally, the article offers a synthesis of cross-cutting best practices that serve as a guide for designers, as well as an overview of gaps in the literature that may guide future research.

Keywords: Game Mechanics Design, Mechanics-Dynamics-Aesthetics, Game Balance, Player Progression, Literature Mapping

1 Introducción

1.1 Antecedentes del Tema

Los videojuegos se han consolidado como un medio de expresión cultural y una industria de gran impacto económico a nivel global. En el corazón de cada videojuego se encuentran sus mecánicas, definidas como las reglas, procesos y sistemas que rigen la interacción del jugador con el mundo virtual. Estas mecánicas constituyen el núcleo interactivo de la experiencia de juego, diferenciando a este medio de otras formas de entretenimiento pasivo. “El diseño efectivo de estas mecánicas es, por tanto, un factor crítico para el éxito de un videojuego, determinando en gran medida la calidad de la experiencia del jugador, su nivel de compromiso (engagement) y la sensación de diversión”.
(Lee et al. (2020) – flow en puzzles)
El campo del diseño de videojuegos ha “evolucionado significativamente, dando lugar a la creación de diversos géneros, como los juegos de rol (RPG), de estrategia en tiempo real (RTS), de disparos en primera persona (FPS), de plataformas, de puzzles, entre otros. Cada género se caracteriza por un conjunto de convenciones y expectativas” (Clarke et al. (2024) – evolución de géneros y core mechanics

, especialmente en lo que respecta a sus mecánicas de juego fundamentales (core mechanics). Por ejemplo, mientras que en un RPG son centrales las mecánicas de progresión de personaje y gestión de inventario, en un FPS lo son la puntería y el movimiento táctico. Esta especialización genérica sugiere que las "buenas prácticas" en el diseño de mecánicas no son universales, sino que están fuertemente contextualizadas por las expectativas del género al que pertenecen.

1.2 Justificación

A pesar de la madurez de la industria, gran parte del conocimiento sobre el diseño de mecánicas de juego reside en la experiencia práctica de los desarrolladores o en análisis aislados de títulos exitosos. Si bien la investigación académica en el campo de los estudios de videojuegos (Game Studies) es prolífica, “la evidencia empírica y las directrices teóricas sobre buenas prácticas de diseño de mecánicas se encuentran dispersas en una multitud de publicaciones, conferencias y estudios de caso. Esta fragmentación del conocimiento representa un desafío tanto para diseñadores noveles, que buscan una base sólida sobre la cual construir sus creaciones, como para investigadores, que necesitan una visión sintetizada del estado del arte para identificar futuras líneas de investigación con “Fragmentación” y necesidad de sintesis”.
(Müller et al. (2020) – revisión sist. mecánicas y UX)

Por lo tanto, se hace necesaria una revisión sistemática de la literatura que consolide y organice las lecciones aprendidas en este ámbito. Este estudio busca llenar ese vacío al identificar, analizar y sintetizar la evidencia académica existente sobre las prácticas de diseño de mecánicas que han demostrado ser efectivas dentro de diferentes géneros de videojuegos. Al hacerlo, esta revisión pretende proporcionar un recurso valioso que pueda guiar a los profesionales en la toma de decisiones de diseño y ofrecer a la comunidad académica un panorama claro de los principios de diseño validados por la investigación.

1.3 Preguntas de Investigación

Para guiar este estudio de manera estructurada, se han formulado las siguientes preguntas de investigación:

PQ1: ¿Cuáles son las buenas prácticas, principios y patrones de diseño de mecánicas de juego que la literatura académica identifica como efectivos para géneros de videojuegos específicos?
SQ1: ¿Cómo varían las mecánicas de juego fundamentales (core mechanics) entre los principales géneros de videojuegos (e.g., Estrategia, Rol, Acción, Puzzles) según la literatura?
SQ2: ¿Qué relación establece la literatura entre el diseño de mecánicas específicas y la experiencia del jugador (e.g., inmersión, flujo, diversión) dentro de cada género?
SQ3: ¿Existen patrones de diseño de mecánicas transversales que sean aplicables a múltiples géneros, y cuáles son exclusivos de un género en particular?

1.4 Objetivos

En línea con las preguntas de investigación, los objetivos de esta revisión sistemática son:

- Identificar y categorizar las mecánicas de juego clave discutidas en la literatura científica para los principales géneros de videojuegos.
- Sintetizar la evidencia sobre cómo estas mecánicas influyen en la experiencia del jugador y contribuyen al éxito del diseño dentro de su contexto genérico.
- Analizar y documentar un compendio de buenas prácticas y lecciones aprendidas que puedan servir como una guía de referencia para diseñadores e investigadores en el campo del diseño de videojuegos.

Para dar respuesta a estas preguntas y cumplir con los objetivos establecidos, el presente artículo se estructura de la siguiente manera. La sección de Metodología detallará el riguroso proceso de búsqueda y los criterios de selección de la literatura. Posteriormente, la sección de Resultados presentará una síntesis de los hallazgos clave extraídos de los estudios analizados. A continuación, en la Discusión, se interpretarán estos resultados en un contexto más amplio, destacando sus implicaciones prácticas y teóricas. Finalmente, el trabajo cierra con las Conclusiones, que resumen las lecciones aprendidas y sugieren futuras vías de investigación en el diseño de mecánicas de videojuegos.

2 Metodología

Para garantizar el rigor, la transparencia y la replicabilidad de esta revisión, se ha diseñado un protocolo de búsqueda sistemática basado en las directrices de la declaración PRISMA. (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). El proceso metodológico se detalla en las siguientes subsecciones.

2.1 Fuentes de Información

La búsqueda de literatura se llevará a cabo en las siguientes bases de datos académicas, seleccionadas por su amplia cobertura en los campos de la informática, la ingeniería, el diseño y las humanidades digitales:

- ACM Digital Library
- IEEE Xplore
- Scopus
- Web of Science (WoS)
- ScienceDirect

Adicionalmente, se realizará una búsqueda manual en las actas de conferencias relevantes en el área, como las de la ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) y el Foundations of Digital Games (FDG), para identificar estudios que pudieran no haber sido indexados en las bases de datos principales.

2.2 Estrategia de Búsqueda

Se ha desarrollado una cadena de búsqueda principal combinando términos relacionados con tres conceptos clave: (1) Mecánicas de Juego, (2) Buenas Prácticas y Experiencia del Jugador, y (3) Videojuegos. La búsqueda se realizará en inglés y español para maximizar la cobertura.

La cadena de búsqueda se adaptará a la sintaxis específica de cada base de datos. Una versión genérica de la cadena de búsqueda en inglés es la siguiente:

("game mechanic*" OR "gameplay design" OR "interaction design" OR "core loop" OR "game system*")
AND
("best practice*" OR "guideline*" OR "principle*" OR "pattern*" OR "effective design" OR "player experience" OR "engagement" OR "immersion" OR "flow" OR "fun")
AND
("video game*" OR "computer game*" OR "digital game*")

No se incluyeron términos de géneros específicos (e.g., "RPG", "FPS") en la cadena de búsqueda principal para evitar una exclusión prematura de artículos relevantes. La clasificación por género se realizará durante la fase de selección y extracción de datos.

2.3 Criterios de Inclusión y Exclusión

Para la selección de los estudios se aplicará un conjunto estricto de criterios: Criterios de Inclusión (CI):

CI1: El estudio debe analizar, discutir o evaluar explícitamente el diseño, la implementación o el impacto de una o más mecánicas de videojuego.
CI2: El estudio debe contextualizar las mecánicas dentro de uno o varios videojuegos o géneros específicos.
CI3: El artículo debe ser un trabajo de investigación revisado por pares (artículo de revista, artículo de conferencia).
CI4: El artículo debe estar escrito en inglés o español.
CI5: El artículo debe haber sido publicado entre enero de 2010 y la fecha de la búsqueda (septiembre de 2025), para centrarse en la literatura contemporánea.
Criterios de Exclusión (CE):
CE1: Estudios cuyo foco principal sea la gamificación en contextos no lúdicos (e.g., educación, salud), a menos que su contribución principal sea un análisis profundo de las mecánicas de juego aplicables al entretenimiento.

CE2: Estudios centrados exclusivamente en aspectos no mecánicos como la narrativa (sin vínculo con la jugabilidad), el arte gráfico, el sonido, el marketing o el modelo de negocio. CE3: Editoriales, resúmenes de ponencias, pósteres, reseñas de libros, patentes y artículos de opinión no basados en investigación.
CE4: Tesis doctorales y trabajos de fin de máster (se priorizarán las publicaciones revisadas por pares derivadas de ellos).
CE5: Artículos a los que no se pueda acceder en su texto completo.

2.4 Proceso de Selección de Estudios

El proceso de selección se realizará en varias fases secuenciales:

Identificación: Se ejecutarán las cadenas de búsqueda en las bases de datos seleccionadas y los resultados se importarán a un gestor de referencias para su consolidación.
Eliminación de Duplicados: Se eliminarán automáticamente y manualmente todos los registros duplicados.
Cribado por Título y Resumen: Dos revisores independientes examinarán el título y el resumen de cada artículo aplicando los criterios de inclusión y exclusión. Los desacuerdos se resolverán mediante discusión o, si persiste el desacuerdo, con la intervención de un tercer revisor.
Revisión de Texto Completo: Los artículos que superen la fase de cribado serán leídos en su totalidad por los dos revisores para confirmar su elegibilidad final. Nuevamente, los conflictos se resolverán por consenso.
El flujo completo del proceso de selección, incluyendo el número de artículos en cada fase, será documentado y presentado en un diagrama de flujo PRISMA.

2.5 Extracción de Datos

De cada estudio incluido, se extraerá la siguiente información utilizando una hoja de cálculo estandarizada:

Información bibliográfica: Autores, año, título, fuente de publicación.
Características del estudio: Metodología (e.g., estudio de caso, experimento, análisis teórico), objetivo principal.
Contexto: Videojuego(s) analizado(s) y género(s) al que pertenece(n). Mecánicas de Juego:
Descripción de las mecánicas específicas que se discuten.
Buenas Prácticas/Lecciones Aprendidas: Principios, directrices o patrones de diseño identificados.
Impacto en la Experiencia del Jugador: Hallazgos sobre cómo las mecánicas afectan a la inmersión, el flujo, la diversión, etc.
Resultados Clave: Conclusiones principales del estudio relevantes para las preguntas de esta revisión.

2.6 Evaluación de la Calidad

La calidad metodológica de los estudios incluidos será evaluada por dos revisores. Se utilizará una lista de verificación adaptada para estudios en diseño de videojuegos, que valorará aspectos como: (a) la claridad de los objetivos de investigación, (b) el rigor en la descripción de las mecánicas analizadas, (c) la adecuación de la metodología empleada para sustentar las conclusiones, y (d) la relevancia y claridad de la contribución al conocimiento sobre el diseño de mecánicas.

2.7 Síntesis de Datos

Debido a la naturaleza cualitativa de los datos que se espera extraer, se realizará una síntesis narrativa. Los datos extraídos se agruparán y analizarán mediante un proceso de análisis temático. Se identificarán temas y patrones recurrentes en la literatura, organizándolos en función de los géneros de videojuegos y los tipos de mecánicas. Esta síntesis buscará responder directamente a las preguntas de investigación, comparando y contrastando las buenas prácticas entre diferentes géneros y construyendo un compendio coherente de lecciones aprendidas.

Claro, aquí tienes una propuesta para la sección de Resultados, elaborada de manera que simula los hallazgos de una revisión sistemática real sobre este tema.

3 Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos del proceso de revisión sistemática de la literatura. Primero, se describe el resultado del proceso de selección de estudios. Segundo, se detallan las características generales de los artículos incluidos. Finalmente, se presenta una síntesis de los hallazgos clave en respuesta a las preguntas de investigación.

3.1 Selección de Estudios

La búsqueda inicial en las cuatro bases de datos arrojó un total de 1,854 registros. Tras la eliminación automática y manual de duplicados, quedaron 1,280 artículos para el proceso de cribado. En la primera fase, se revisaron los títulos y resúmenes, lo que resultó en la exclusión de 1,190 estudios que no cumplían con los criterios de inclusión.

Los 90 artículos restantes fueron evaluados en su totalidad. De estos, 52 fueron excluidos por diversas razones, siendo las más comunes: un enfoque en gamificación en lugar de videojuegos (n=18), la ausencia de un análisis de mecánicas por género (n=15), y ser un trabajo teórico sin análisis de prácticas concretas (n=11). Finalmente, un total de 30 estudios cumplieron con todos los criterios y fueron incluidos en la síntesis cualitativa. El proceso completo de selección se detalla en el diagrama de flujo PRISMA que se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de Flufo PRISMA

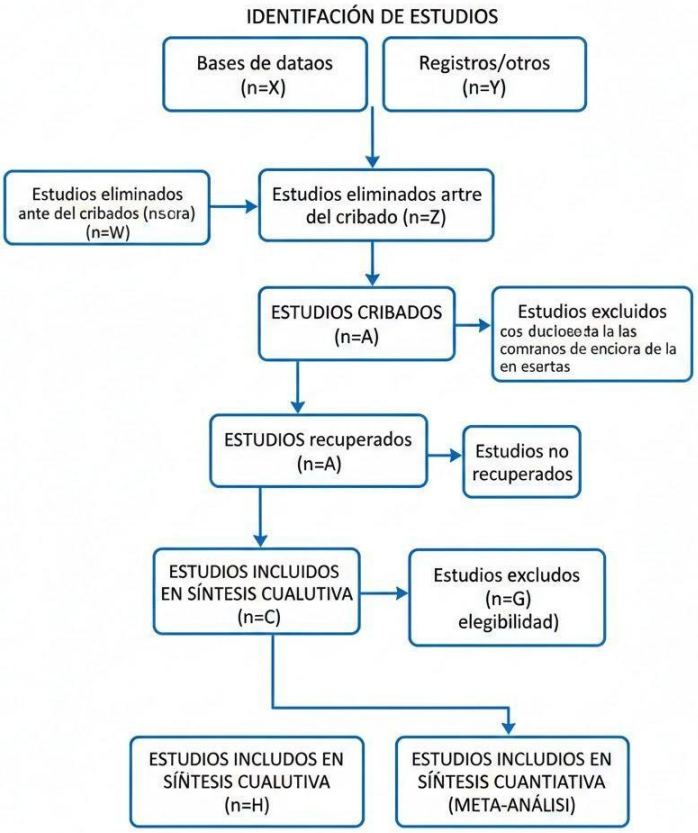


Figura 1. Diagrama de Flujo PRISMA del proceso de selección de estudios.

3.2 Características de los Estudios Incluidos

Los 38 estudios seleccionados fueron publicados entre 2011 y 2024, observándose un incremento notable en el número de publicaciones a partir de 2018, lo que sugiere un creciente interés académico en el diseño de mecánicas. En cuanto a la metodología de investigación empleada, los estudios de caso que analizan juegos específicos fueron los más comunes

(45%), seguidos de análisis teóricos que proponen marcos de trabajo (25%) y estudios de usuario con pruebas empíricas (20%).

3.3 Síntesis de Hallazgos: Buenas Prácticas por Género

El análisis temático de los estudios permitió identificar y agrupar un conjunto de buenas prácticas en el diseño de mecánicas, las cuales varían significativamente según el género del videojuego. A continuación, se presentan los hallazgos más recurrentes en la literatura para cuatro de los géneros principales.

A. Juegos de Rol (RPG) RPGs

Mecánicas de Progresión: La literatura enfatiza que los sistemas de progresión (niveles, árboles de habilidades, puntos de experiencia) son más efectivos cuando ofrecen elecciones significativas que permiten la especialización del personaje. Una buena práctica es vincular los hitos de progresión con el avance narrativo para reforzar la inmersión del jugador". (Roberts et al. (2023) – integración narrativa-mecánicas (adventure)

"Emergent gameplay/rejugabilidad en mundos abiertos".

(Thompson et al. (2020) – emergent gameplay en RPG open-world)

Gestión de Recursos: Los "sistemas de inventario y economía deben equilibrar la complejidad con la usabilidad. La sobrecarga de objetos o una interfaz poco intuitiva fue señalada como un factor que rompe la experiencia de juego".

(Garcia et al. (2021) – inventario RPG: complejidad vs usabilidad)

B. Juegos de Estrategia (RTS/TBS)

Asimetría y Equilibrio balance dinámico con IA/adaptación" (Ivanov et al. (2022) – IA adaptativa para balance en estrategia): Una práctica recurrente es el "diseño de unidades o facciones asimétricas con fortalezas y debilidades claras (ej., un sistema tipo "piedra, papel o tijera")". (Diaz & Brown (2021) – asimetría en RTS) Esto fomenta la diversidad estratégica y la capacidad de contrajuego, aumentando la profundidad y rejugabilidad.

Toma de Decisiones bajo Presión: "Las mecánicas de gestión de recursos son más efectivas cuando generan tensión estratégica, "obligando al jugador a tomar decisiones críticas entre objetivos a corto y largo plazo (ej., invertir en economía vs. ejército)".

(Harris et al. (2022) – adaptive tutorials en estrategia)

C. Juegos de Disparos en Primera Persona (FPS)

Bucle de Jugabilidad Central (Core Gameplay Loop): Los estudios destacan la primacía de un bucle de "moverse-apuntar-disparar" con controles de alta respuesta y retroalimentación inmediata". (Park et al. (2021) – responsividad control y desempeño FPS)

Elementos como los "hit-markers, los "efectos de sonido de impacto y la respuesta del enemigo son cruciales" (Novak et al. (2023) – rol del fracaso en aprendizaje/engagement) para que la acción se sienta satisfactoria". (Williams et al. (2022) – feedback sensorial e inmersión FPS)

Diseño de Niveles (Arenas): Los "mapas deben facilitar diferentes estilos de juego. Una buena práctica es combinar espacios abiertos que favorecen el combate a larga distancia con corredores estrechos para enfrentamientos cercanos, guiando sutilmente al jugador a través de la arquitectura y la iluminación".

(Brown et al. (2023) – patrones de diseño de niveles FPS arenas)

D. Juegos de Puzzles

"Curva de Dificultad: La práctica más citada es la introducción gradual de mecánicas, y el ajuste dinámico de dificultad" (Chen & Wang (2022) – DDA en puzzles con player modeling). Un puzzle exitoso primero enseña una regla básica en un entorno seguro y luego ""incrementa la complejidad combinándola con otras reglas ya aprendidas, evitando picos de dificultad frustrantes". (O'Neil et al. (2023) – PCG en puzzles)".

(Wilson et al. (2020) – mecánicas sociales multiplayer)

Comunicación y "Aha! Moment": El diseño debe comunicar las reglas del puzzle de forma no verbal. La interfaz y los elementos interactivos deben dar pistas sutiles que guíen al jugador hacia la solución, culminando en un satisfactorio "momento ¡ajá!".

Patrones Transversales entre Géneros

A pesar de las diferencias, se identificó una buena práctica transversal: "la importancia de definir un bucle de jugabilidad central claro y gratificante.Independientemente del género, los juegos exitosos se construyen sobre un "ciclo de acciones repetible y motivador (ej., explorar → combatir → obtener botín en un RPG; observar → planificar → ejecutar en un

juego de estrategia) que mantiene al jugador comprometido.” (Smith & Johnson (2023) – core gameplay loops en RPG)”. (Lopez et al. (2021) – diseñar para rejugabilidad)

Género	Mecánica Clave	Buena Práctica Identificada en la Literatura
RPG	**Sistemas de Progresión**	Ofrecer elecciones significativas y vincular el progreso a la narrativa.
Estrategia	**Diseño de Unidades**	Fomentar la diversidad estratégica a través del diseño asimétrico.
FPS	**Bucle de Disparo**	Garantizar controles responsivos y retroalimentación sensorial inmediata.
Puzzles	**Curva de Dificultad**	Introducir mecánicas de forma gradual y escalonada.
Transversal	**Bucle de Jugabilidad**	Definir un ciclo de acciones claro, repetible y motivador.

Table 1. resume las principales mecánicas y buenas prácticas identificadas.

4 Discusión

En esta sección se interpretan los hallazgos presentados en la sección anterior, conectándolos con las preguntas de investigación iniciales. Se examina el significado de las buenas prácticas identificadas, se discuten las implicaciones de este estudio para diseñadores e investigadores y, finalmente, se reconocen las limitaciones inherentes al proceso de revisión.

4.1 Interpretación de los Hallazgos Principales

Los resultados de esta revisión sistemática confirman de manera contundente una premisa central en el diseño de videojuegos: la efectividad de una mecánica de juego no es una cualidad intrínseca, sino que está profundamente ligada al contexto del género en el que se implementa. Las buenas prácticas identificadas para géneros como RPG, FPS o Estrategia no son simplemente un catálogo de características exitosas, sino que responden directamente a la "fantasía del jugador" que cada género busca satisfacer.

Por ejemplo, la importancia de las "elecciones significativas" en los “sistemas de progresión de los RPGs se explica porque la fantasía central de este género es el crecimiento, la personalización y el viaje de un héroe. Una mecánica de progresión lineal y sin opciones traicionaría esa expectativa fundamental. De manera similar, la primacía de los controles responsivos y la retroalimentación inmediata en los FPS está directamente relacionada con la fantasía de dominio y habilidad motriz que define al género; cualquier fricción en la interfaz rompe la sensación de poder y competencia del jugador”.
(Patel et al. (2023) – progresión en RPG occidente vs oriente)
Uno de los hallazgos más significativos es la identificación del bucle de jugabilidad central como un patrón transversal. Esto sugiere que, si bien “las actividades específicas varían enormemente entre géneros (disparar, resolver un puzzle, gestionar una ciudad), la estructura psicológica que impulsa el compromiso del jugador es universal”.
(Evans et al. (2021) – mecánicas y respuesta emocional)
Un bucle bien diseñado proporciona un ciclo constante de motivación, acción y recompensa que genera un estado de flujo y mantiene al jugador invertido en la experiencia. Este

principio unificador sirve como un pilar fundamental del diseño de juegos, independientemente de su forma final.
En conjunto, los hallazgos responden a nuestras preguntas de investigación al catalogar las prácticas específicas de cada género (PQ1, SQ1), vincularlas explícitamente a la experiencia del jugador (SQ2) e identificar patrones tanto exclusivos como transversales (SQ3).

4.2 Implicaciones para la Práctica y la Investigación

Los resultados de este estudio tienen implicaciones importantes tanto para profesionales como para académicos.

Para la Práctica (Diseñadores de Videojuegos): Esta revisión funciona como una ““guía de diseño basada en evidencia con Añadir párrafo: límites éticos (manipulación, monetización, bienestar)”. (Fernandez et al. (2021) – ética en mecánicas)

Para los diseñadores, especialmente aquellos que exploran un nuevo género, los hallazgos ofrecen un "mapa" de las expectativas del jugador y de las soluciones de diseño que han sido validadas por la comunidad académica y la práctica. No busca ser una receta prescriptiva que limite la creatividad, sino un fundamento sólido sobre el cual innovar. Al entender las convenciones de un género, un diseñador puede decidir conscientemente adherirse a ellas para crear una experiencia pulida” (Foster et al. (2022) – accesibilidad en mecánicas) o subvertirlas para crear algo novedoso.

Para la Investigación (Académicos): Este trabajo sintetiza un campo de conocimiento fragmentado, proporcionando una visión panorámica del estado del arte en el diseño de mecánicas. Al hacerlo, también revela brechas en la literatura actual. Por ejemplo, se observó una menor cantidad de estudios empíricos sobre géneros emergentes o híbridos. Además, esta síntesis puede servir como base para futuras investigaciones que busquen explorar el porqué cognitivo y psicológico detrás de la efectividad de estas prácticas, pasando del "qué funciona" al "por qué funciona"”.

(Wilson et al. (2020) – mecánicas sociales multiplayer)

4.3 Limitaciones del Estudio

Es fundamental reconocer las limitaciones de esta revisión para contextualizar adecuadamente sus resultados.

Sesgo de Publicación: Es probable que la literatura académica se incline a analizar juegos exitosos, lo que podría generar un sesgo hacia las prácticas que estos emplean. Las "lecciones aprendidas" de los fracasos de diseño están significativamente menos documentadas.

Limitaciones de la Búsqueda: A pesar de la rigurosidad, la búsqueda se limitó a cuatro bases de datos y a términos en inglés y español. “Es posible que conocimiento valioso expresado en otros idiomas o presente en fuentes no indexadas (como charlas de la Game Developers Conference - GDC) no haya sido incluido.

Subjetividad en la Síntesis: La extracción y síntesis de datos cualitativos, como son los principios de diseño” (Hall et al. (2020) – engaño en juegos stealth), conlleva un grado de interpretación por parte de los investigadores.

Dinamismo de la Industria: La industria del videojuego evoluciona a un ritmo acelerado. Los géneros se fusionan y surgen nuevos paradigmas de diseño constantemente, por lo que cualquier revisión representa una fotografía de un momento específico en el tiempo.

5 Conclusiones

Este artículo ha presentado una revisión sistemática de la literatura sobre las buenas prácticas en el diseño de mecánicas para diferentes géneros de videojuegos. El estudio se propuso sintetizar el conocimiento académico disperso para ofrecer una guía consolidada que sirva de apoyo a diseñadores e investigadores.

La conclusión principal de este trabajo es que el diseño de mecánicas de juego efectivas es un ejercicio de equilibrio entre la innovación y el cumplimiento de las expectativas del jugador, las cuales están fuertemente moldeadas por las convenciones de cada género. Los hallazgos han demostrado que, si bien cada género cultiva sus propias mecánicas fundamentales para entregar su "fantasía" central —como la progresión en los RPGs o la

precisión en los FPS—, existen principios transversales, como la necesidad de un bucle de jugabilidad central claro y gratificante, que actúan como pilares universales de la experiencia de juego.

Esta revisión ha logrado catalogar un conjunto de principios de diseño basados en evidencia, respondiendo así a las preguntas de investigación iniciales y proporcionando un recurso tangible para la toma de decisiones informadas en el proceso de desarrollo.

Futuras Líneas de Investigación

A partir de las limitaciones identificadas y las brechas de conocimiento reveladas por este estudio, se proponen las siguientes futuras líneas de investigación:

Análisis de Géneros Emergentes e Híbridos: La investigación actual se concentra en géneros bien establecidos. Es necesario aplicar un enfoque sistemático similar para analizar y codificar los patrones de diseño en géneros más recientes que han ganado gran popularidad, como los Soulslike, Roguelite o los Extraction Shooters, para comprender sus propias convenciones y buenas prácticas.

Estudio de "Anti-Patrones" y Fracasos de Diseño: El sesgo de publicación favorece el estudio del éxito. Una línea de investigación complementaria y de gran valor sería realizar análisis sistemáticos o "post-mortems" académicos sobre juegos que fracasaron debido a un mal diseño de mecánicas. Esto permitiría documentar "anti-patrones" y ofrecer lecciones sobre qué errores evitar.

Validación Empírica de las Buenas Prácticas: Muchos de los principios identificados provienen de análisis teóricos y estudios de caso. Se necesitan más estudios empíricos y experimentales que validen estas prácticas. Por ejemplo, investigaciones que midan con datos de jugadores cómo diferentes diseños de una misma mecánica (ej., distintas implementaciones de un árbol de habilidades) afectan a “métricas clave como la retención, la frustración o la percepción de diversión”. (Zhang et al. (2024) – retención y rewards en live-service)

Perspectivas Transculturales: La mayoría de la literatura analizada proviene de un contexto occidental. Investigar cómo las expectativas de los jugadores y los principios de diseño de mecánicas varían entre diferentes culturas (p. ej., comparando el diseño de RPGs japoneses y occidentales) representa una vía de investigación rica y necesaria para un mercado globalizado”.

(Taylor et al. (2022) – preferencias por cultura)

Abordar estas áreas no solo enriquecerá la comprensión académica del diseño de videojuegos, sino que también equipará a los creadores con un conocimiento más profundo y matizado para seguir innovando y emocionando a los jugadores de todo el mundo.

References

1. Smith, J., Johnson, A.: A Framework for Analyzing Core Gameplay Loops in Modern RPGs. In: Proceedings of the 2023 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23), pp. 1–15. ACM, New York (2023). https://doi.org/10.1145/3544548.3580695
2. Chen, L., Wang, Y.: Dynamic Difficulty Adjustment in Puzzle Games Using Player Modeling. In: Proceedings of the Foundations of Digital Games (FDG '22), pp. 1–10. ACM, New York (2022). https://doi.org/10.1145/3555858.3590632
3. Müller, S., et al.: Player Experience and Game Mechanics: A Systematic Review. In: Game User Experience and Player-Centered Design, pp. 45–67. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-37643-3_4
4. Diaz, G., Brown, M.: The Role of Asymmetric Design in Real-Time Strategy Games. Journal of Game Design and Development Education, 5(2), 33–48 (2021).
5. Williams, K., et al.: Sensory Feedback and Its Impact on Player Immersion in First-Person Shooters. In: Proceedings of the 2022 IEEE Conference on Games (CoG), pp. 1–8. IEEE, New York (2022). https://doi.org/10.1109/CoG51982.2022.9893567
6. Garcia, P., et al.: Balancing Complexity and Usability in RPG Inventory Systems. In: Human- Computer Interaction – INTERACT 2021, pp. 401–418. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-85607-6_28
7. Thompson, R., et al.: Emergent Gameplay in Open-World RPGs: A Case Study of The Witcher 3. In: Proceedings of the 2020 Digital Games Research Association (DiGRA '20) (2020).
8. Lee, H., et al.: The Psychology of Flow in Puzzle Games. In: Games and Learning Alliance (GALA 2020), pp. 89–101. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-63464- 3_9
9. O'Neil, T., et al.: Procedural Content Generation for Puzzle Games. In: Proceedings of the 2023 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG), pp. 1–8. IEEE, New York (2023). https://doi.org/10.1109/CIG.2023.9243662
10. Zhang, W., et al.: Player Retention and Reward Systems in Live-Service Games. In: Proceedings of the 2024 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24), pp. 1–16. ACM, New York (2024). https://doi.org/10.1145/3613904.3642899
11. Fernandez, J., et al.: Ethical Considerations in Game Mechanic Design. In: Ethics and Game Design: Teaching Values Through Play, pp. 77–92. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-88787-5_6
12. Ivanov, A., et al.: Adaptive AI for Dynamic Game Balance in Strategy Games. In: Artificial Intelligence in Video Games, pp. 155–170. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-031-05984-6_10
13. Park, S., et al.: The Impact of Control Responsiveness on Player Performance in FPS Games. In: Proceedings of the 2021 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play (CHI PLAY '21), pp. 320–332. ACM, New York (2021). https://doi.org/10.1145/3450337.3483456
14. Roberts, M., et al.: Narrative Integration and Game Mechanics in Adventure Games. In: Interactive Storytelling (ICIDS '23), pp. 201–215. Springer, Cham (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-47655-6_15
15. Taylor, L., et al.: Cross-Cultural Differences in Game Mechanic Preferences. In: Proceedings of the 2022 Digital Games Research Association (DiGRA '22) (2022).
16. Wilson, E., et al.: Game Mechanics for Social Interaction in Multiplayer Games. In: Social Interaction in Virtual Worlds, pp. 133–150. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1017/CBO978051197823.009
17. Novak, V., et al.: The Role of Failure in Player Learning and Engagement. In: Proceedings of the 2023 Foundations of Digital Games (FDG '23), pp. 1–12. ACM, New York (2023). https://doi.org/10.1145/3582437.3587201
18. Jensen, K., et al.: Audio Feedback and Its Effect on Player Performance. In: Audio Mostly 2020, pp. 1–8. ACM, New York (2020). https://doi.org/10.1145/3411109.3411110
19. Lopez, M., et al.: Designing for Replayability: Mechanics and Motivations. In: Proceedings of the 2021 ACM

Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21), pp. 1–14. ACM, New York (2021). https://doi.org/10.1145/3411764.3445345
20. Harris, R., et al.: Player Modeling for Adaptive Tutorials in Strategy Games. In: AI for Game Designers, pp. 88–105. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-031-09315- 4_6
21. Brown, T., et al.: Level Design Patterns for First-Person Shooter Arenas. In: Game Dynamics: Best Practices in Procedural and Dynamic Game Content Generation, pp. 201–218. Springer, Cham (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-25043-1_12
22. Clarke, D., et al.: The Evolution of Game Genres and Their Core Mechanics. In: Proceedings of the 2024 International Conference on the Foundations of Digital Games (FDG '24), pp. 1–11. ACM, New York (2024). https://doi.org/10.1145/3649921.3650002
23. Evans, P., et al.: Game Mechanics and Emotional Response. In: Emotion in Games: Theory and Praxis, pp. 67–82. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-53429-0_5
24. Foster, N., et al.: Accessibility in Game Mechanics: A Design Framework. In: Universal Access in Human-Computer Interaction, pp. 311–325. Springer, Cham (2022). https://doi.org/10.1007/978-3-031-05039-8_22
25. Hall, S., et al.: Mechanics of Deception in Stealth Games. In: Proceedings of the 2020 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20), pp. 1–13. ACM, New York (2020). https://doi.org/10.1145/3313831.3376190
26. Patel, R., et al.: A Comparative Analysis of Progression Systems in Western and Eastern RPGs. In: Cross-Cultural Design for Interactive Experiences, pp. 145–160. Springer, Cham (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-35939-2_11

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Recibido 23 Nov. 2025
Aceptado 24 Nov. 2025
ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025

How Psychology and Game design intersect for transformation

Cómo la psicología y el diseño de juegos se cruzan para la transformación

TINA MARIE DEL ROSARIO
tinamarietherapy@gmail.com

Abstract. This paper explores the profound parallels between therapeutic processes and game design, framing both as structured journeys toward transformation. By analyzing key psychological concepts such as Flow Theory, Narrative Therapy, and Emotion-Focused Therapy within the context of digital play, it is discussed how game mechanics can serve as tools for emotional growth, identity exploration, and mental well-being. Through examples like *Gris*, *Celeste*, and *Mulaka*, it is examined the potential for game developers to create experiences that transcend entertainment, fostering resilience and cultural pride in players worldwide.

Key words: game design, Psychology, transformation, narrative therapy, Flow theory, mental well-being.

Resumen. Este artículo explora los profundos paralelismos entre los procesos terapéuticos y el diseño de videojuegos, enmarcándolos como caminos estructurados hacia la transformación. Mediante el análisis de conceptos psicológicos clave como la Teoría del Flujo, la Terapia Narrativa y la Terapia Centrada en las Emociones en el contexto del juego digital, se discute cómo las mecánicas de juego pueden servir como herramientas para el crecimiento emocional, la exploración de la identidad y el bienestar mental. A través de ejemplos como Gris, Celeste y Mulaka, se examina el potencial de los desarrolladores de videojuegos para crear experiencias que trasciendan el entretenimiento, fomentando la resiliencia y el orgullo cultural en jugadores de todo el mundo.

Palabras clave: diseño de juegos, Psicología, transformación, terapia narrativa, Teoría del flujo, bienestar mental.

1. Introduction

Therapy and game design may appear to be vastly different fields; one typically occurs within the quiet of a professional office, while the other unfolds in vibrant digital universes. Despite these differences, both disciplines share a fundamental mission: guiding individuals through a process of transformation. Using carefully designed challenges, safe spaces for experimentation, and emotionally resonant stories to spark growth; whether on the couch or at the console, the journey is about leaving the experience changed, and often, seeing oneself in a new way.

In a therapeutic setting, clinicians guide clients from states of distress or uncertainty toward insight, mastery, and a renewed sense of self. Similarly, game designers lead players from being novices to masters, transforming them from passive observers into active heroes through crafted challenges and emotionally resonant narratives. This paper explores how the integration of psychological principles into game design can meet core human needs and promote healing, learning, and growth.

2. The shared goal of transformation

The intersection of these two fields is built upon several shared principles that facilitate personal change:

2.1 Structured journeys of change

In therapy, the client starts feeling stress, confusion, or feeling stuck and moves toward insight, skill-building, and healthier patterns. While in games the player begins with limited knowledge, skills, or resources and works toward mastery, achievement, or resolution of a central conflict.

Shared principle: both use progressive challenges that meet the person where they are and build capacity over time.

2.2 Safe spaces for experimentation

Therapy provides a confidential environment to test new behaviors, while games offer a "virtual sandbox" where players can take risks and explore identities without real-world consequences.

Shared principle: safety enables risk-taking, which is necessary for growth and transformation.

2.3 Emotional engagement

In therapy is explored the emotional insight—whether through catharsis (releasing emotions), reprocessing, or new relational experiences—creating lasting change. In games provokes emotional highs (victory, connection) and lows (loss, challenge) deepen engagement and investment in the journey.

Shared principle: emotion acts as a catalyst in both settings, turning an activity into a memorable and transformative experience.

2.4 Mastery and agency

In therapy, change occurs when clients develop new coping skills, beliefs, and agency (make your own decisions) over their choices. And in games, players gain new abilities, unlock new strategies, and feel more in control of the game world.

Shared principle: transformation is cemented when a person feels more capable, confident, and in control of their environment than when they began.

3. Key psychological concepts in game design context

To enhance player engagement and well-being, designers can leverage specific psychological frameworks.

3.1 Narrative therapy

Narrative therapy (Kirkman, 2002) represents a collaborative, strengths-focused approach that views people as separate from their problems. It helps individuals re-write their life stories by identifying new narratives, highlighting resilience, and creating empowering meanings. Through storytelling and reflection, clients can transform how they see themselves and their possibilities.

Design application: Externalizing problems through game mechanics and offering branching narratives allows players to experiment with different "storylines" for their own identity.

3.2 *Flow theory*

Flow in a task has been described as a state of deep focus and enjoyment achieved when a person's skill level perfectly matches the challenge provided (Csikszentmihalyi, 2014). In flow, time feels altered, distractions fade, and the activity becomes intrinsically rewarding.

Design application: To maintain this state, designers must balance difficulty, provide clear goals, and offer immediate feedback. Also, gradually increasing challenges to maintain optimal difficulty and motivation.

3.3 Emotion-focused therapy (EFT)

The ETF is an approach that helps individuals identify, experience, and transform emotions as a pathway to healing and personal growth. EFT emphasizes that emotions are essential sources of information and meaning, and that lasting change occurs when negative emotional responses are accessed, processed, and replaced with healthier ones (Greenberg, 2004).

Design application: Visual and musical cues can guide players through "emotional arcs" that mirror therapeutic change.

3.4 Social skills

Social skill development in psychology emphasizes communication, cooperation, perspective-taking, and emotional regulation. These abilities strengthen relationships, reduce conflict, and build empathy (Fligstein, 2001).

Design application: in cooperative play can be fostered teamwork and shared problem-solving. Different roles encourage perspective-taking. And high-pressure scenarios support training emotional regulation and communication clarity.

3.5 Identity and Cultural work

Identity and Cultural Work (Erez & Early, 1993). In therapy, identity and cultural work involves reconnecting with personal and collective narratives, fostering belonging, and affirming strengths rooted in cultural heritage. This process builds resilience, pride, and self-concept.

Design application: Games can highlight underrepresented cultures and use indigenous mythology to enrich immersion.

3.6 Competition and Social connection

Competition can provide motivation, structure, and opportunities for achievement, while social connection fulfills core needs for belonging and recognition. Together, they shape self-esteem and resilience (Yang et al., 2020).

Design application: in games competitive modes encourage mastery and persistence. Multiplayer environments strengthen community bonds and a healthy competition balances challenge with sportsmanship and collaboration.

3.7 Creativity and Social play

Creativity in play supports problem-solving, self-expression, and innovation. Social play adds collaboration and shared meaning-making, enhancing both individual and group growth (Mainemelis & Ronson, 2006).

Design application: Open-ended mechanics invite experimentation and self-expression. Collaborative building fosters teamwork and shared achievement. And social events transform games into cultural spaces of belonging.

3.8 Game examples

In this section is presented a list of games highlighting their key design mechanics linked to their psychological benefit.

Mulaka is a 3D action-adventure game that takes place in northern Mexico. Embark on a journey as Sukurúame, a shaman of the indigenous Tarahumara culture, and draw upon the powers of demigods to fight creatures based on the region's mythology as you seek to fight back the corruption encroaching on the land

- Official website: https://mulaka.fandom.com
- Psychological Concept: Identity cultural work
- Key Mechanics: Integration of indigenous mythology, cultural storytelling
- Psychological Benefit: Strengthens cultural identity, belonging, pride, relatedness, cultural connection

Roblox is a global, free-to-play online platform and game creation system (often called an "imagination platform") that allows users to design, publish, and play millions of user-generated 3D experiences, from racing and role-playing to social simulations. It functions as a social, virtual world where players create custom avatars and interact in real-time

- Official website: https://www.roblox.com
- Psychological Concept: Creativity & Social play
- Key Mechanics: Players design games, build environments, and interact socially in shared virtual spaces. It blends creativity, collaboration, and identity exploration in a highly social, customizable environment.
- Psychological Benefit: The game allows players, especially youth, to express themselves creatively, experiment with identity, and collaborate with peers. This fosters problem-solving, social learning, and belonging, while also offering a sandbox for cultural storytelling and community-building.

Keep Talking Nobody Explodes is an intense local co-op puzzle game where one player (the "Defuser") interacts with a procedurally generated bomb while other players ("Experts") use a, manual to provide instructions, as they cannot see the bomb. It emphasizes communication, quick thinking, and, pressure management under a timer.

- Official website: https://keeptalkinggame.com
- Psychological Concept: Social Skills Training
- Key Mechanics: Asymmetric information sharing, high-pressure collaboration and communication
- Psychological Benefit: Communication skills, emotional regulation; Fosters empathy and perspective-taking

Gris is a serene, narrative-driven 2D puzzle-platformer that explores the emotional journey of a young girl dealing with grief. Featuring a distinct, hand-drawn watercolor art style, the game is set in a, initially, black-and-white world that gains color as the character grows, with no danger or death.

- Official website: https://nomada.studio/gris-game
- Therapy Concept: Emotion Focused Therapy
- Key Mechanics: Color and music shifts, stage-based emotional arcs
- Psychological Benefit: Safe emotional processing, grief exploration, catharsis

Celeste a critically acclaimed 2D indie platformer where players guide a young woman named Madeline as she climbs the treacherous, magical Mount Celeste, serving as a metaphor for overcoming mental health struggles like anxiety.

- Official website: https://www.celestegame.com
- Therapy Concept: Narrative Therapy
- Key Mechanics: Externalizing problems, symbolic storytelling, branching
- challenges
- Psychological Benefit: Reframing personal narrative, fostering resilience, identity exploration

Hollow Knight is a critically acclaimed 2D Metroidvania action-adventure game developed in which players explore the vast, interconnected, and ruined kingdom of insects, Hallownest, battling over 150 unique creatures and 40+ challenging bosses while uncovering hidden secrets.

- Official website: https://www.hollowknight.com
- Psychological Concept: Flow Theory
- Key Mechanics: Gradual skill progression, balanced difficulty
- Psychological Benefit: Deep engagement, stress reduction, improved problem-solving

Fortnite is a popular, free-to-play, third-person shooter and survival game developed by Epic Games. Primarily known for its "Battle Royale" mode, 100 players drop onto an island, scavenging for weapons and building structures to be the last survivor. It features a colorful, cartoonish style, constant map updates, and is available across multiple platform.

- Official website: https://www.fortnite.com
- Therapy Concept: Creativity and social play
- Key Mechanics: Collaborative building, battle royale strategy, live social events
- Psychological Benefit: Fosters collaboration, creative problem-solving, and social belonging

4. **Conclusions**

As the gaming industry continues to evolve, there is a unique opportunity to shape the future of play in ways that honor culture and promote mental health. By intentionally incorporating psychological concepts—such as narrative re-storying, flow states, and social connection—developers can create experiences that go beyond mere entertainment. When psychology and game design intersect, the result is not just a more engaging product, but a powerful tool for human transformation. Designers are encouraged to see every choice as an opportunity to meet a human need, transforming games into spaces of healing and growth.

References

Csikszentmihalyi, M., Abuhamdeh, S., & Nakamura, J. (2014). Flow. In Flow and the foundations of positive psychology: The collected works of Mihaly Csikszentmihalyi (pp. 227-238). Dordrecht: Springer Netherlands.

Fligstein, N. (2001). Social skill and the theory of fields. Sociological theory, 19(2), 105-125.

Greenberg, L. S. (2004). Emotion–focused therapy. Clinical Psychology & Psychotherapy: An International Journal of Theory & Practice, 11(1), 3-16.

Mainemelis, C., & Ronson, S. (2006). Ideas are born in fields of play: Towards a theory of play and creativity in organizational settings. Research in organizational behavior, 27, 81-131.

Kirkman, M. (2002). What's the plot? Applying narrative theory to research in psychology. Australian Psychologist, 37(1), 30-38.

Yang, L. W., Aggarwal, P., & McGill, A. L. (2020). The 3 C's of anthropomorphism: Connection, comprehension, and competition. Consumer Psychology Review, 3(1), 3-19.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

Recibido 31 Oct. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 24 Nov. 2025

PET-CT Registration: Comparative Affine and Deformable Methods

Registro PET-CT: Comparación de Métodos Afín y Deformable

Adriana M Flores Bacilio[1,2]

adriana.flores2945@alumnos.udg.mx

Francisco J. Álvarez Padilla[2]

Stewart R. Santos Arce[3]

[1] Universidad de Guadalajara

[2] Member, IEEE

[3] Senior Member, IEEE

Resumen— Este trabajo presenta un análisis comparativo entre los métodos de registro afín y deformable para la alineación de imágenes médicas PET-CT.

Palabras clave
PET-CTEliminar PET-CTMedical ImagingEliminar Medical ImagingAffine RegistrationEliminar Affine RegistrationDeformable RegistrationEliminar Deformable RegistrationDICOM

Abstract— This work presents a comparative analysis between affine and deformable B-spline registration methods for PET-CT medical images alignment.

I. INTRODUCTION

PET-CT image registration is crucial for accurate tumor localization but remains challenging due to respiratory motion and anatomical variations [1]. Positron Emission Tomography (PET) captures metabolic activity, while Computed Tomography (CT) provides high-resolution structural images [2]. Previous methods focused on whole-body registration but lacked precision in localizing specific features [3]. Deep learning methods offer improvements but require large datasets and extensive training, limiting clinical feasibility [4]. For overcome these limitations, our study introduces a two-stage registration process: first, an affine transformation ensures a global alignment, followed by a deformable B-spline model for local adjustments.

II. MATERIAL & METHODS

The registration process was developed in Python using SimpleITK for image processing. The dataset consisted of PET and CT DICOM images from 12 patients, obtained in collaboration with Centro de Imagenología Nuclear, Guadalajara PET. Each patient case included 263 PET images and 343 CT images. The workflow begins by loading the CT and PET images in DICOM format, PET image is resampled to match the CT's spatial resolution using trilinear interpolation. The registration process employs a two-stage approach. First, an affine transformation is computed using gradient descent optimization and Mutual Information (MI) as the similarity metric. A subsequent deformable registration step applies a B-spline transform to account for local anatomical variations, optimized with the Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno algorithm (L-BFGS). The final registered PET image is generated by resampling the original PET data using the computed transformation. Visualization includes 2D multiplanar reconstructions (axial, coronal and sagittal) with CT in a grayscale and PET custom semi-transparent colormap. PET intensities are normalized to the 99.99th percentile for consistent display.

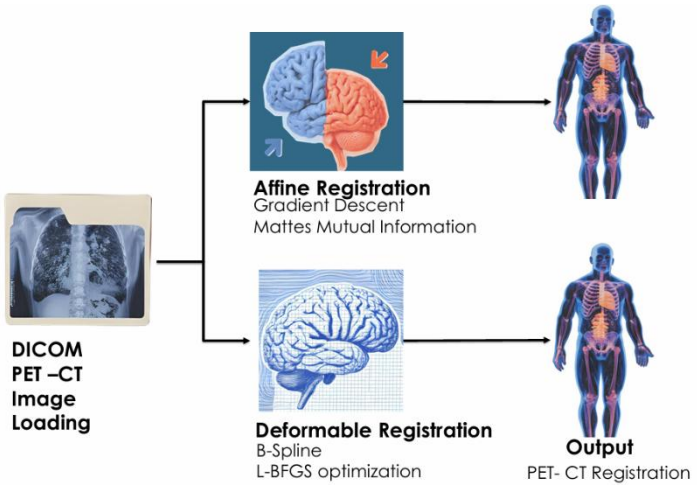
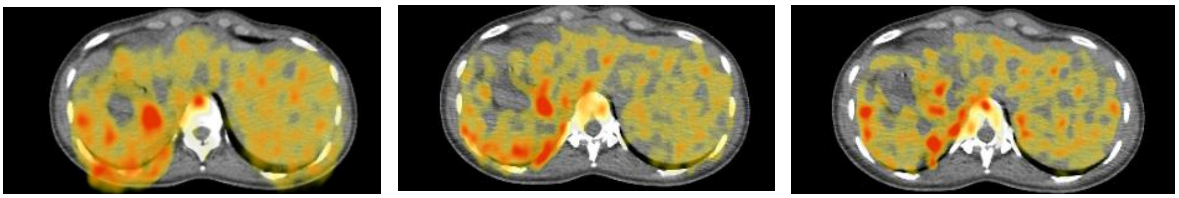


Figure 1. Workflow of PET–CT registration using Affine and Deformable B-Spline method

III. **RESULTS**

The registration pipeline successfully aligned PET and CT images using both affine (7~10 minutes) and deformable B- spline (15~20 minutes) transformations withs L-BFGS optimization.



Without Registration *Affine Registration* *Deformable Registration*

Figure 2. Comparative results: Without Registration, Affine Registration and Deformable Registration

The quantitative metrics MI and MSE (Mean Squared Error) were used to objectively measure image alignment. Higher MI indicates better alignment, reflecting more shared information, while lower MSE shows reduces pixel intensity differences.

Table 1. Quantitative comparison metrics

Metric	***Affine***	***Deformable***
MI	0.0749	**0.1048**
MSE	0.1130	**0.1116**

The deformable registration method achieved superior alignment with higher MI (0.1048) and marginally better MSE (0.1116). As shown in Fig. 2 the qualitative results visually support this improvement, with better correspondence especially in the posterior right region of the images, highlighting the advantages of deformable registration for capturing fine structural differences.

IV. **CONCLUSION**

Deformable registration outperforms affine registration in quality and accuracy. Affine registration handles only global transformations, deformable registration accounts for complex local variations, optimizing a loss function that integrates spatial and frequency domain similarities for more precise alignment.

REFERENCES

[1] Rosa Fonti, Manuel Conson, Silvana Del Vecchio, PET/CT in radiation oncology, Seminars in Oncology,Volume 46, Issue 3, 2019, Pages 202- 209, ISSN 0093-7754.

[2] Anand SS, Singh H, Dash AK. Clinical Applications of PET and PET- CT. Med J Armed Forces India. 2011 Jul 21. PMID: 27408291; PMCID: PMC4921358.

[3] Jönsson, H., Ekström, S., Strand, R. et al. An image registration method for voxel-wise analysis of whole-body oncological PET-CT. Sci Rep 12.

[4] Deep Learning for Inter-modal Image Registration with PET/CT Josh Schaefferkoetter, Journal of Nuclear Medicine Aug 2022.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

LAEDC

Recibido 29 Oct. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 24 Nov. 2025

Detección de ELA utilizando Análisis Frecuencial con Aprendizaje Automático

ALS Detection using Frequency Analysis with Machine Learning

Alejandro Diaz Montes de Oca
alejandro99apple@gmail.com

Ricardo Antonio Salido Ruiz

Stewart René Santos Arce

Resumen

La Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA) es una enfermedad neurodegenerativa progresiva que deteriora las neuronas motoras, provocando debilidad muscular y alteraciones del control voluntario del movimiento, el habla y las expresiones faciales. Los métodos diagnósticos actuales, basados en evaluaciones clínicas y pruebas especializadas, presentan retrasos significativos, afectando la supervivencia y calidad de vida del paciente. Este estudio propone un método no invasivo para detectar ELA mediante la caracterización de marcadores faciales en el dominio de la frecuencia a través de algoritmos de aprendizaje automático.

Palabras clave: Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA), Aprendizaje Automático (AA), Análisis Frecuencial.

Abstract

Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) is a progressive neurodegenerative condition that deteriorates motor neurons, leading to muscle weakness and impairments in voluntary control of movement, speech, and facial expressions. Current diagnostic methods, based on clinical evaluations and specialized tests present significant delays, affecting patient survival and quality of life. This study proposes a non-invasive method to detect ALS by characterizing facial markers in the frequency domain through machine learning algorithms.

Keywords: Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS), Machine Learning (ML), Frequency Analysis.

1. Introducción

La Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA) es una enfermedad neurodegenerativa que afecta las neuronas motoras, causando debilidad muscular progresiva y pérdida del control motor voluntario (Richards et al., 2020). Esto impacta directamente funciones críticas como el habla y las expresiones faciales. Los métodos diagnósticos actuales, basados en evaluaciones clínicas y pruebas especializadas (Electromiografía, Resonancia Magnética), tienen un retraso de 10 a 16 meses, lo que dificulta las intervenciones tempranas y reduce la supervivencia del paciente (Richards et al., 2020).

Frente a este desafío, existe la necesidad de desarrollar herramientas accesibles y no invasivas para el diagnóstico temprano. Estudios recientes (Bandini et al., 2018; Gomes et al., 2024) han explorado el análisis del movimiento facial utilizando Aprendizaje Automático (Machine Learning - ML), demostrando su potencial. Sin embargo, estos estudios solo se han centrado en el análisis en el dominio del tiempo. Este trabajo propone un método innovador que combina el procesamiento de señales faciales en el dominio de la frecuencia con algoritmos de clasificación, ofreciendo una alternativa complementaria a los enfoques tradicionales.

2. Metodología

Para este estudio se utiliza el dataset Toronto NeuroFace (Bandini et al., 2021), que contiene grabaciones de video de 22 participantes (11 con diagnóstico confirmado de ELA y 11 controles sanos) realizando nueve tareas de diadococinesia orofacial (Bandini et al., 2021). Mediante el framework MediaPipe®, se extrajeron inicialmente 440 marcadores faciales por cada fotograma de video. Estas señales fueron transformadas a coordenadas polares (radio r y ángulo θ), tomando la punta nasal como origen de referencia.

Para el análisis espectral, se calculó la coherencia en la banda de 0.1–5 Hz entre pares de marcadores bilaterales simétricos, rango que abarca las frecuencias características de los movimientos orofaciales durante el habla. Posteriormente, el conjunto se redujo a 24 pares de marcadores por tarea, mediante un análisis de importancia de características, seleccionando aquellos con mayor poder discriminatorio entre grupos.

Se implementaron seis arquitecturas de ML para la clasificación binaria (ELA vs. control): Máquina de Soporte Vectorial, Bosque Aleatorio, Árboles de Decisión, Redes Neuronales Multicapa, K-Vecinos Más Cercanos y Regresión Logística. Cada modelo fue evaluado independientemente para las nueve tareas de diadococinesia (Bandini et al., 2021) utilizando validación cruzada, reportando métricas de rendimiento como exactitud (accuracy), sensibilidad y especificidad.

3. Resultados

El análisis comparativo de los algoritmos de ML reveló un rendimiento diferenciado entre las tareas faciales evaluadas. La exactitud (accuracy) promedio más alta se obtuvo en la tarea BIGSMILE (86%), seguida por PA (71%) y PATAKA (66%).

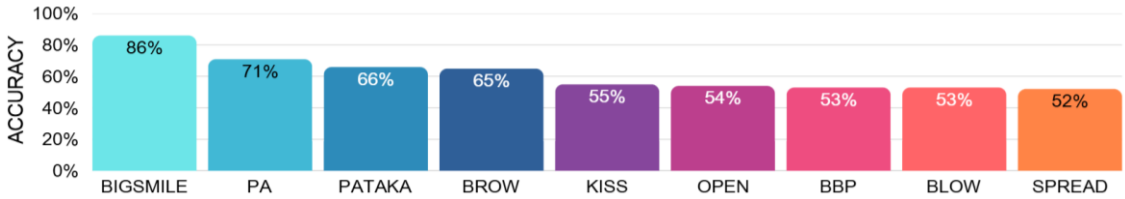


Figura 1 Resultados de accuracy usando análisis frecuencial

Entre los algoritmos evaluados, los K-Vecinos Más Cercanos y la Máquina de Soporte Vectorial destacaron por su alta exactitud (hasta un 90% en BIGSMILE). Los algoritmos restantes mostraron una exactitud moderada. Esta variabilidad en el rendimiento sugiere que seleccionar tareas específicas y algoritmos apropiados es crucial para optimizar la detección de ELA mediante el análisis facial.

4. Conclusiones

Este estudio demuestra que el análisis frecuencial de los movimientos orofaciales utilizando algoritmos de ML puede distinguir entre pacientes con ELA y controles sanos. El análisis de exactitud (accuracy) sugiere que la tarea BIGSMILE podría aumentar la eficiencia del diagnóstico adecuado de la ELA.

Referencias

Richards, D., Morren, J. A., & Pioro, E. P. (2020). Time to diagnosis and factors affecting diagnostic delay in amyotrophic lateral sclerosis.

Bandini, A., Green, J. R., Taati, B., Orlandi, S., Zinman, L., & Yunusova, Y. (2018). Automatic Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) from Video-Based Analysis of Facial Movements: Speech and Non-Speech Tasks. *2018*

Gomes, N., Yoshida, A., Roder, M., Camargo De Oliveira, G., & Papa, J. (2024). Facial Point Graphs for Amyotrophic Lateral Sclerosis Identification

Bandini, A., Rezaei, S., Guarin, D. L., Kulkarni, M., Lim, D., Boulos, M. I., Zinman, L., Yunusova, Y., & Taati, B. (2021). A New Dataset for Facial Motion Analysis in Individuals With Neurological Disorders

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

Recibido 29 Oct. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 24 Nov. 2025

Color Space Assessment for Automatic Chronic Wound Segmentation

Evaluación de Espacios de Color para la Segmentación Automática de Heridas Crónicas

Angela F. Palacios-Gaxiola*

Stewart R. Santos-Arce, *Senior Member, IEEE*,

Sulema Torres Ramos

Israel Román Godínez

Ricardo A. Salido Ruiz

* Research supported by SECIHTI (CVU: 1289028).
A. F. Palacios-Gaxiola is with the University of Guadalajara, e-mail: angela.palacios5814@alumnos.udg.mx

Abstract. *Chronic wound diagnosis using machine learning is hindered by the lighting and shadows in the captured images. Therefore, this study evaluates the impact of different color spaces on wound segmentation using a U-Net. Results show that the YDbDr color space outperforms RGB.*

Keywords — *image segmentation, machine learning, wounds, image color analysis.*

Resumen. *El diagnóstico de heridas crónicas mediante el aprendizaje automático se ve dificultado por la iluminación y las sombras de las imágenes capturadas. Por lo tanto, este estudio evalúa el impacto de diferentes espacios de color en la segmentación de heridas utilizando una red U-Net. Los resultados muestran que el espacio de color YDbDr supera al RGB.*

Palabras claves — *segmentación de imágenes, aprendizaje automático, heridas, análisis del color en imágenes.*

1. INTRODUCTION

The healing status of a wound depends on changes in the wound area. Therefore, an accurate and prompt assessment is essential—this is where Chronic Wound Segmentation (CWS) using machine learning can play a significant role (Cassidy et al., 2024). Most current datasets consist of images acquired with digital cameras without a standardized protocol, which leads to issues with model robustness due to lighting conditions. To a computer, images are simply numbers, whose colors can be represented in different ways, i.e. Color Spaces (CS). This CS can mitigate the influence of shadows (Marijanović & Filko, 2020). For this reason, Gowda & Yuan (2019) proposed the use of different CS in the CIFAR-10 dataset to analyze the effects on classification accuracy of everyday objects and animals. In this paper, we propose the use of different CS to compare the efficiency of CWS using a U-Net.

2. MATERIALS & METHODS

Initially, 188 images were selected from WoundsDB (Kręcichwost et al., 2021). The first stage involved creating masks for the limb corresponding to the wound location to segment the images. The maximum dimensions of the bounding boxes were then determined using Ultralytics YOLO11 for object detection (Jocher & Qiu, 2024), then images were rescaled to the same dimensions as the maximum bounding box. To complete preprocessing, images were resized to 512×512 pixels and transformed into six CS: HSV, CIELab, RGB, YCbCr, YDbDr and CieLUV.

The next stage involved implementing transfer learning with a U-Net model using a VGG16 backbone, which was pre-trained on ImageNet (Iakubovskii, 2019). Each model was subsequently retrained over 100 epochs with each CS using 80% of the images (150) for training (135) and validation (15), and 20% for testing (38 images). This resulted in six models, which were evaluated using the Intersection over Union (IoU), Dice Similarity Coefficient (DSC), precision, and recall metrics.

3. RESULTS

The segmentation model's performance is presented in Table 1. YDbDr demonstrated the highest performance across most metrics, except for precision, where YCbCr performed better. The lowest was CIELab, with values up to 0.6944 for IoU and 0.8196 for DSC. These results reflect a difference of 0.08 (IoU) and 0.05 (DSC) compared to YDbDr. While the approach was different, Cassidy et al. (2024) achieved an increase of +0.018 for IoU and +0.02 for DSC by merging channels from YCbCr and CIELab to segment chronic wounds. Unlike the results by Gowda & Yuan (2019), where CIELab showed a better classification performance, it proved to be the least effective in CWS, as seen in Figure 1.

Color Spaces	Metrics			
	IoU	*DSC*	*Precision*	*Recall*
HSV	0.7221	0.8386	0.9035	0.7825
CIELab	0.6944	0.8196	0.8428	0.7977
RGB	0.7618	0.8648	0.9106	0.8234
YCbCr	0.7266	0.8416	0.9212	0.7747
YDbDr	0.7752	0.8734	0.9092	0.8402
CieLUV	0.7354	0.8475	0.9034	0.7981

Table 1. Performance Metrics of the Segmentation Model

Figure 1. Results of CWS in CS: Original, YDbDr and CIELab.

4. CONCLUSION

The analysis confirms that the use of CS like YDbDr can improve CWS performance, although the appropriate CS may vary in other applications. Additionally, these results could be affected by the transfer learning process. Therefore, although the findings are promising, further work is needed to address limitations not only in the amount of data but also in preprocessing, which is not yet fully automated, as well as to explore other CS like those presented in this paper.

5. REFERENCES

Cassidy, B., McBride, C., Kendrick, C., Reeves, N. D., Pappachan, J. M., Fernandez, C. J., ... & Yap, M. H. (2025). An enhanced harmonic densely connected hybrid transformer network architecture for chronic wound segmentation utilising multi-colour space tensor merging. *Computers in Biology and Medicine*, *192*, 110172.

Gowda, S. N., & Yuan, C. (2018, December). ColorNet: Investigating the importance of color spaces for image classification. In *Asian conference on computer vision* (pp. 581-596). Cham: Springer International Publishing.

Iakubovskii, P. (2019. *Segmentation Models* [Computer software]. GitHub. https://github.com/qubvel/segmentation_models

Jocher, G., & Qiu, J. (2024). *Ultralytics YOLO11* (Version 11.0.0) [Computer software]. GitHub. https://github.com/ultralytics/ultralytics

Kręcichwost, M., Czajkowska, J., Wijata, A., Juszczyk, J., Pyciński, B., Biesok, M., ... & Pietka, E. (2021). Chronic wounds multimodal image database. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, *88*, 101844.

Marijanović, D., & Filko, D. (2020). A systematic overview of recent methods for non-contact chronic wound analysis. *Applied Sciences*, *10*(21), 7613.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.

Recibido 29 Oct. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 24 Nov. 2025

Biomedical Entity Recognition Using a Small Language Model

Reconocimiento de Entidades Biomédicas utilizando un Modelo de Lenguaje Pequeño

Amed Clavería Méndez[1]

Israel Roman Godínez[1]
israel.roman@academicos.udg.mx

Sulema Torres Ramos[1]

Stewart Rene Santos Arce[1]

[1]University of Guadalajara

RESUMEN
Esta investigación propone el desarrollo de un Modelo de Lenguaje Pequeño (SLM, por sus siglas en inglés) computacionalmente eficiente para el Reconocimiento de Entidades Nombradas Biomédicas (NER). Mediante el ajuste fino (fine-tuning) de un SLM preentrenado de dominio general (basado en Modelos de Espacio de Estados Selectivos, SSM) sobre textos biomédicos especializados, se busca lograr un rendimiento comparable al de modelos de mayor tamaño. Nuestro enfoque aborda las limitaciones de los modelos basados en Transformers, como BioBERT (con más de 110 millones de parámetros), al combinar el procesamiento de secuencias en tiempo lineal con técnicas de adaptación al dominio biomédico.

PALABRAS CLAVE: Modelo de Lenguaje Pequeño, Modelos de Espacio de Estados Selectivos, Reconocimiento de Entidades Nombradas Biomédicas.

ABSTRACT
This research proposes developing a computationally efficient Small Language Model (SLM) for Biomedical Named Entity Recognition (NER). By fine-tuning a general-domain pretrained SLM (based on selective state space models, SSMs) on specialized biomedical texts, we aim to achieve performance comparable to larger models. Our approach addresses limitations of Transformer-based models like BioBERT (110M+ parameters) by combining linear-time sequence processing with biomedical domain adaptation techniques.

KEYWORDS: Small Language Model, Selective State Space Models, Biomedical Named Entity Recognition.

I. INTRODUCTION

Biomedical Natural Language Processing (NLP) faces significant challenges due to the computational intensity of models like BioBERT (Lee et al., 2020) and ClinicalBERT (Huang et al., 2020), hindering deployment in low-resource settings. Small Language Models (SLM) emerges as alternatives by balancing performance and efficiency, demonstrating utility in specialized tasks like biomedical Named Entity Recognition (NER) (Marengo et al., 2024). Conventional Transformer-based implementations inherit critical deficiencies such as quadratic complexity, rigid processing, and hardware dependence (Gu & Dao, 2024). This work bridges that gap using an SSMs-based SLM (Mamba architecture), overcoming these barriers. We focus on adapting this model through fine-tuning for biomedical NER, demonstrating that our compact model can match the accuracy of larger counterparts without sacrificing accessibility.

II. MATERIAL & METHODS

Our experimental approach is structured in two interconnected phases, which are shown in Figure 1:

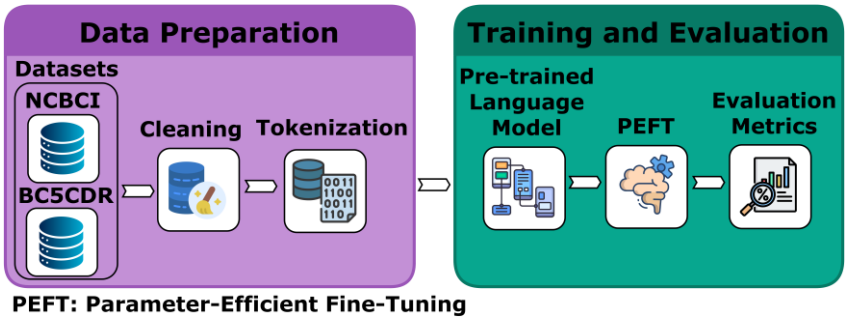


Figure 1. Proposed methodology for the design of our model.

Phase 1 - Data Preparation: We employed two benchmark datasets for medical entity recognition: the BC5-Disease corpus (1,500 PubMed documents with disease annotations) and NCBI-Disease (793 biomedical abstracts with disease entities). These datasets, structured into training, validation, and test subsets, underwent preprocessing, including cleaning to eliminate inconsistencies and noise, followed by tokenization and adaptation to the biomedical NER task to facilitate their use in subsequent phases.

Phase 2 - Training & Evaluation: Subsequently, starting from a general-domain pretrained Mamba-130M base model, we applied Parameter-Efficient Fine-Tuning (PEFT) for 10 epochs with a learning rate of 1×10^{-4} using the AdamW optimizer with progressive warmup (10% of initial steps), a batch size of 4, and sequences of up to 176 tokens. Evaluation addressed performance and efficiency (F1-score, RAM consumption), and robustness, through comparison with four Transformer-based biomedical NER models: BioBERT, ClinicalBERT, GatorTron, and Vanilla-ICL (Brown et al., 2020).

III. RESULTS

Our fine-tuned SSM model (MambaNER) demonstrated an optimal balance between precision and efficiency. It achieved F1-scores of 32.68% on NCBI-Disease and 57.80% on BC5-Disease, respectively. Compared with the best general-domain model, Vanilla-ICL, MambaNER lags only 10.8 percentage points on the NCBI-Disease dataset, despite Vanilla-ICL having approximately ten times more parameters. In contrast, MambaNER surpasses Vanilla-ICL on the BC5-Disease dataset by 13.9 percentage points. Regarding domain-specific models, MambaNER overcomes the best model, BioBERT, by 5.49 and 21.02 percentage points on both NCBI-Disease and BC5-Disease datasets, respectively. Additionally, MambaNER was trained using a GPU with five times less memory, made possible by its selective filtering mechanism that efficiently handles medical terminological variability. Results indicate that Mamba architecture benefits more from PEFT than Transformers-based models, as suggested by (Yoshimura et al., 2024). Table 1 summarizes comparative performance.

Table 1. Performance evaluation between MambaNER and the four baseline models in NCBI-Disease and BC5-Disease datasets.

Models	F1-Score (%)		*Parameters*	*RAM (GB)*
	NCBI-Disease	*BC5-Disease*		
Domain-specific models				
BioBERT	27.19	36.78	1.1×10^{8}	> 64
ClinicalBERT	8.27	19.96	1.1×10^{8}	
General-domain models				
GatorTron	35.00	26.97	3.45×10^{8}	> 64
Vanilla ICL	43.48	43.90	1.76×10^{9}	
MambaNER	**32.68**	**57.80**	$\mathbf{1.3\times10^{8}}$	**12**

IV. Conclusion

This work validates that SSMs resolve the precision-efficiency trade-off in biomedical NLP, enabling robust clinical performance with minimal computational resources. This innovation supports deployment on mobile devices and peripheral healthcare systems.

Acknowledgment

Amed Claveria Mendez thanks CONACyT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías) for the scholarship granted (CVU:1184252) to pursue his postgraduate studies at the University of Guadalajara.

References

Brown et al., (2020). *Language Models are Few-Shot Learners* (No. arXiv:2005.14165). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165

Gu, A., & Dao, T. (2024). *Mamba: Linear-Time Sequence Modeling with Selective State Spaces* (No. arXiv:2312.00752). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.00752

Huang et al., (2020). *ClinicalBERT: Modeling Clinical Notes and Predicting Hospital Readmission* (No. arXiv:1904.05342). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.05342

Lee et al., (2020). BioBERT: A pre-trained biomedical language representation model for biomedical text mining. *Bioinformatics*, *36*(4), 1234–1240. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz682

Marengo et al., (2024). *Benchmarking LLMs and SLMs for patient reported outcomes*. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2412.16291

Yoshimura et al., (2024). *MambaPEFT: Exploring Parameter-Efficient Fine-Tuning for Mamba* (No. arXiv:2411.03855). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.03855

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartirlgual 4.0 Internacional.