

Ciencia y tecnología: una visión de los Cuerpos Académicos del CUValles

Héctor Huerta Avila
Eréndira Álvarez Tostado Martínez
Juan Carlos Mixteco Sánchez
COORDINADORES EDITORIALES



UNIVERSIDAD DE
GUADALAJARA

Red Universitaria e Institución Benemérita de Jalisco



DIRECTORIO INSTITUCIONAL

Mtra. Karla Alejandrina Planter Pérez

RECTORA GENERAL DE LA UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Dra. María Luisa García Bátiz

RECTORA DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE LOS VALLES

Dr. Víctor Hugo González Becerra

SECRETARIO ACADÉMICO DEL CENTRO UNIVERSITARIO
DE LOS VALLES

Mtro. Luis Alejandro León Dávila

SECRETARIO ADMINISTRATIVO DEL CENTRO UNIVERSITARIO
DE LOS VALLES

Dra. Eréndira Álvarez Tostado Martínez

DIRECTORA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS
Y TECNOLÓGICOS, CENTRO UNIVERSITARIO DE LOS VALLES

Dr. Héctor Huerta Avila

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES
E INGENIERÍAS, CENTRO UNIVERSITARIO DE LOS VALLES

Dra. María Alejandra Carreón Alvarez

JEFA DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES
Y EXACTAS, CENTRO UNIVERSITARIO DE LOS VALLES

© COORDINADORES EDITORIALES

Héctor Huerta Avila

Eréndira Álvarez Tostado Martínez

Juan Carlos Miixteco Sánchez

© AUTORES

Alejandro Reyes Morales

Oscar Susano Dalmau Cedeño

Teresa Efigenia Alarcón Martínez

Francisco Eduardo Oliva Ibarra

Héctor Huerta Avila

María Alejandra Carreón Alvarez

Marciano Sanchez Tizapa

Rocío Castañeda Valderrama

Miriam Marcela Tostado Plascencia

César Calderón Mayorga

Francisco Eduardo Oliva Ibarra

Claudia Janet Amparo Torrealba García

Marco Antonio Gómez Herrera

Rogelio Rodriguez Rodriguez

Ailen Guadalupe Becerra Ávila

Gloria Arlette Méndez Maldonado

Iván Guillén Escamilla

José Guillermo Méndez Bermúdez

José Abundio Daniel Alva Tamayo

Juan Carlos Mixteco Sánchez

César Álvarez Medina

Aldo Aparicio Martínez Merino

Roberto Alejandro Santos Silva

María Alicia López Osorio

Eric Martínez Pascual

Primera edición, mayo de 2026

D. R. © 2026 Universidad de Guadalajara

ISBN 978-607-646-004-7



Este trabajo está autorizado bajo la licencia Creative Commons
Atribución-NoComercialSinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-
NC-ND) lo que significa que el texto puede ser compartido y
redistribuido, siempre que el crédito sea otorgado al autor, pero
no puede ser mezclado, transformado, construir sobre él ni
utilizado con propósitos comerciales. Para más detalles
consulte [https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/
deed.es](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es)

Centro Universitario de los Valles

Carretera Guadalajara - Ameca km. 45.5

C.P. 46600, Ameca, Jalisco, México.

Editado y hecho en México

Edited and made in Mexico

Ciencia y tecnología: una visión de los Cuerpos Académicos del CUValles

Héctor Huerta Avila
Eréndira Álvarez Tostado Martínez
Juan Carlos Mixteco Sánchez

COORDINADORES EDITORIALES

Contenido

Presentación.....	9
1. Reconocimiento de núcleos de células escamosas en imágenes provenientes de citologías de cuello uterino.....	11
<i>Alejandro Reyes Morales, Oscar Susano Dalmau Cedeño, Teresa Efigenia Alarcón Martínez y Francisco Eduardo Oliva Ibarra</i>	
2. Monitoreo inalámbrico de parámetros físico-químicos en cuerpos de agua	29
<i>Héctor Huerta Avila, María Alejandra Carreón Alvarez, Marciano Sanchez Tizapa, Rocío Castañeda Valderrama y Miriam Marcela Tostado Plascencia</i>	
3. Análisis de índices de rendimiento escolar de Ingeniería en Geofísica del CUValles, Universidad de Guadalajara	45
<i>César Calderón Mayorga, Francisco Eduardo Oliva Ibarra, Claudia Janet Amparo Torrealba García y Marco Antonio Gómez Herrera</i>	
4. Aplicaciones de hidrogeles a base de quitosano para la curación de heridas: una breve revisión	61
<i>Rogelio Rodriguez Rodriguez y Ailen Guadalupe Becerra Avila</i>	
5. Historia de la simulación molecular.....	77
<i>Gloria Arlette Méndez Maldonado, Iván Guillén Escamilla José Guillermo Méndez Bermúdez, José Abundio Daniel Alva Tamayo y Juan Carlos Mixteco Sánchez</i>	
6. Termodinámica de los agujeros negros: una revisión	93
<i>César Álvarez Medina, Aldo Aparicio Martínez Merino Roberto Alejandro Santos Silva, María Alicia López Osorio y Eric Martínez Pascual</i>	

Agradecimientos

La publicación de este libro se financió con recursos del Programa de Difusión y Divulgación de la Ciencia, Tecnología e Innovación (DyD) 2023, del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL), a través del proyecto con número de folio 10912-2023.

El equipo editorial agradece a los expertos externos a la Universidad de Guadalajara, que compartieron su tiempo y experiencia en la revisión de los capítulos del libro, por su generosa contribución a la calidad científica de esta publicación:

Dr. Alfredo López Ortega
Dra. Castalia Alenka Negrete Peñaloza
Dra. Gabriela Calvario Sánchez
Dr. Héctor Javier Ibarra Medel
Dr. José Sánchez Rodríguez
Dr. Julio Ruiz Palmero
Dr. Ramón Castañeda Priego

Presentación

La División de Estudios Científicos y Tecnológicos del Centro Universitario de los Valles se enorgullece de presentar esta obra, una compilación de investigaciones que refleja el esfuerzo y la dedicación de nuestros cuerpos académicos. Este libro simboliza nuestro compromiso con la generación y difusión del conocimiento, acercando a la comunidad académica y al público en general una muestra representativa de los avances científicos y tecnológicos que se desarrollan en nuestra institución.

En estas páginas, el lector encontrará una diversidad de temas, que abarcan desde las Ciencias de la Salud hasta las Ingenierías, pasando por las Ciencias Exactas. Para facilitar la lectura y comprensión, los capítulos se han organizado por áreas del conocimiento, lo que permite apreciar la profundidad y amplitud de las líneas de investigación cultivadas en la División.

En el área de Ciencias de la Salud, se presentan investigaciones innovadoras como la aplicación de hidrogeles en la curación de heridas y el empleo de la inteligencia artificial para el diagnóstico del cáncer cervical. Estos capítulos reflejan el compromiso de la División con la búsqueda de soluciones innovadoras para problemas médicos, combinando la ciencia básica con el desarrollo de tecnologías avanzadas para el cuidado de la salud. Los lectores podrán apreciar cómo herramientas computacionales contribuyen a mejorar la precisión y eficiencia en el diagnóstico de enfermedades.

Por su parte, en las Ciencias Exactas, se exploran temas interesantes como la historia de la simulación molecular y la termodinámica de

los agujeros negros. Estas contribuciones invitan a reflexionar sobre los fundamentos de la materia y la energía, además de ofrecer un recorrido histórico sobre el desarrollo de la simulación molecular y su importancia para entender sistemas físicos y químicos. Asimismo, se profundiza en el enigmático mundo de los agujeros negros, analizando sus propiedades termodinámicas y su conexión con las leyes fundamentales de la física.

Finalmente, en el área de Ingeniería, se presentan investigaciones sobre el monitoreo inalámbrico de parámetros fisicoquímicos en cuerpos de agua y el análisis del rendimiento escolar en la carrera de Ingeniería en Geofísica. Estos capítulos muestran la aplicación del conocimiento científico en la solución de problemas concretos, y el desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar la calidad de vida. Se describe un sistema innovador para el monitoreo de la calidad del agua, que permite la medición de variables fisicoquímicas de forma remota y en tiempo real. Además, se presenta un análisis del rendimiento escolar en la carrera de Ingeniería en Geofísica, con el objetivo de identificar áreas de oportunidad y mejorar la formación de los estudiantes.

Cada capítulo ofrece un resumen conciso y accesible del trabajo de investigación realizado, destacando sus principales hallazgos y contribuciones al conocimiento. Esperamos que esta obra sirva como punto de partida para futuras investigaciones y colaboraciones, y que inspire a las nuevas generaciones de científicos e ingenieros a seguir explorando las fronteras del conocimiento.

Los invitamos a adentrarse en este recorrido por la ciencia y la tecnología, con la certeza de que encontrarán en estas páginas, una fuente de información valiosa y un testimonio del compromiso de la División de Estudios Científicos y Tecnológicos con la generación y difusión del conocimiento.

DRA. ERÉNDIRA ÁLVAREZ TOSTADO MARTÍNEZ

Directora de la División de Estudios
Científicos y Tecnológicos

1. Reconocimiento de núcleos de células escamosas en imágenes provenientes de citologías de cuello uterino

Alejandro Reyes Morales¹

Oscar Susano Dalmau Cedeño^{1,2}

Teresa Efigenia Alarcón Martínez¹

Francisco Eduardo Oliva Ibarra¹

Resumen

El cáncer cervical es el cuarto cáncer más diagnosticado entre las mujeres en todo el mundo, y es una de las principales causas de muerte para ellas. El diagnóstico se realiza manualmente mediante el análisis de células en pruebas de Papanicolaou, lo que provoca retrasos en los diagnósticos y resulta en una alta tasa de falsos positivos. Para abordar este problema, se propone un modelo de red neuronal artificial de Perceptrón Multicapa (MLP), utilizando las características RGB con la finalidad de reconocer automáticamente los núcleos de células escamosas. Para el entrenamiento del modelo, se utilizaron dos conjuntos de datos: uno público: CRIC y uno proporcionado por un Laboratorio Estatal de Salud Pública de Michoacán. El modelo propuesto logró una precisión de 0.9256 en el CRIC y de 0.9713 en el de Michoacán.

Palabras clave: cáncer cervical, Papanicolaou, red neuronal, célula escamosa, núcleo de célula escamosa.

1 Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, Carretera Guadalajara-Ameca km. 45.5, C.P. 46600, Ameca, Jalisco, México, alejandro.reyes1537@alumnos.udg.mx.

2 Centro de Investigación en Matemáticas, A. C.

1. Introducción

El cáncer cervical se ubica como la cuarta neoplasia más común entre las mujeres a nivel global, con aproximadamente 604,000 nuevos casos diagnosticados y 340,000 defunciones registradas en el año 2020 (Dasgupta, 2023; Regional Committee for Europe, 2022). Se destaca que alrededor de 90% de estas muertes se concentran en naciones subdesarrolladas y en vías de desarrollo (Regional Committee for Europe, 2022; Regional Committee for the Western Pacific, 2022). La principal causa de esta patología radica en la infección persistente por el virus del papiloma humano (VPH), responsable de aproximadamente el 95% de los casos de cáncer cervical. Es importante señalar que el proceso de transformación maligna de células anormales, indicativas de la presencia de cáncer, tarda entre 15 a 20 años, destacando así la necesidad de un diagnóstico temprano en el éxito y pronóstico del tratamiento (Bogani *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2023; Regional Committee for Europe, 2022).

La citología cervical, también conocida como la prueba de Papanicolaou, representa la técnica más ampliamente utilizada a nivel mundial para la detección del cáncer cervical. Esta metodología implica la recolección de células cervicales, que son sometidas a múltiples procesos de preparación química antes de ser remitidas a laboratorios clínicos para su análisis. Profesionales expertos llevan a cabo una evaluación manual para distinguir entre células normales y anormales, usando microscopios para identificar cualquier irregularidad que sugiera la presencia de cáncer cervical o lesiones precursoras (Corkum *et al.*, 2019; Liang *et al.*, 2021). Sin embargo, la naturaleza de esta clasificación resulta una inversión considerable de tiempo por parte de los especialistas para analizar cada muestra, así como en una elevada tasa de falsos positivos debidos a errores humanos (Chankong *et al.*, 2014; Dasgupta, 2023). Esta metodología, además de costosa y poco eficiente, limita a los especialistas a examinar solo un reducido número de pruebas de Papanicolaou diariamente (4 a 5), lo que deriva en una sobrecarga laboral significativa, fatiga visual y retrasos en los diagnósticos, con implicaciones críticas en el pronóstico y tratamiento de esta enfermedad (Chankong *et al.*, 2014; Corkum *et al.*, 2019; Dasgupta, 2023).

Con el propósito de mitigar las repercusiones negativas asociadas con la evaluación y clasificación manual de células en pruebas de

Papanicolaou, la comunidad científica ha dirigido sus esfuerzos hacia el desarrollo de sistemas automáticos para la clasificación y segmentación celular, a través de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje profundo. Estos sistemas se proponen reducir el tiempo de análisis, minimizar los falsos positivos y aumentar el número de pruebas estudiadas diariamente, con el objetivo de impactar positivamente en el pronóstico y tratamiento del cáncer cervical mediante diagnósticos más oportunos (Alias *et al.*, 2023; Chankong *et al.*, 2014). No obstante, la detección y clasificación automáticas de núcleos de células escamosas, relevantes para la detección de esta enfermedad, representan un desafío considerable debido a la complejidad y diversidad inherente de las imágenes procedentes de pruebas de Papanicolaou. A pesar de los avances realizados por la comunidad científica en este campo, aún falta mejorar el rendimiento de estos sistemas de diagnóstico automático en términos de precisión y confiabilidad (Alias *et al.*, 2023, 2023; Youneszade *et al.*, 2023).

La complejidad de la tarea de diagnóstico automático se refleja en la existencia actual de sistemas experimentales que todavía requieren intervención manual en alguna etapa del proceso, lo que ralentiza significativamente el procedimiento. Asimismo, sistemas que emplean imágenes de células individuales, aunque presentan cierta viabilidad, enfrentan desafíos en la automatización del recorte de imágenes, una etapa crítica para su implementación práctica. Además de la variabilidad inherente en las imágenes, esta complejidad se atribuye a factores diversos, que incluyen la presencia de múltiples tipos de células en las muestras y artefactos generados durante los procesos químicos previos al análisis manual de las pruebas de Papanicolaou, contribuyendo así a la dificultad en la detección automática y propiciando la clasificación errónea de artefactos como células escamosas (Alias *et al.*, 2023).

El tratamiento de esta problemática ha sido limitado hasta la fecha, dado que ningún laboratorio clínico en el mundo ha implementado un sistema de diagnóstico automático de cáncer cervical debido a la complejidad inherente del problema de clasificación automática de células. Para atender este desafío, el presente estudio implementa un modelo de red neuronal artificial, específicamente un Perceptrón Multicapa (MLP, por sus siglas en inglés) (Gardner & Dorling, 1998), para el reconocimiento automático de núcleos pertenecientes a células escamosas. El enfoque

se centra en el análisis de las intensidades en los canales rojo (R), verde (G) y azul (B) de las áreas pertenecientes a núcleos de células escamosas presentes en las imágenes en color, el conocido RGB. Para ello se utilizaron dos conjuntos de datos, uno público y otro proporcionado por el Laboratorio Estatal de Salud Pública del Estado de Michoacán, con el fin de probar y evaluar el rendimiento del clasificador.

1.1. Objetivo

El objetivo general de este trabajo es:

- Desarrollar un algoritmo de reconocimiento de núcleos de células escamosas que permita identificar de forma automática o semiautomática la presencia de células malignas en imágenes digitales provenientes de citologías de cuello uterino procedentes de un microscopio.

2. Metodología

En esta sección se describen todas las fases de la investigación realizada, desde la selección de las bases de datos de imágenes hasta el diseño e implementación de experimentos. Asimismo, se indican las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del modelo.

2.1. Selección de las bases de datos

En esta investigación se consideraron dos bases de datos:

- Base de datos CRIC (Center for Recognition and Inspection of Cells): contiene 400 imágenes con células normales y anormales (Rezende *et al.*, 2021).
- Base de datos Michoacán: 254 imágenes provenientes de Papanicolaou (Laboratorio Estatal de Salud Pública del Estado de Michoacán, 2024).

2.2. Generación de los datos para entrenamiento del modelo y pruebas

En esta investigación se utilizó un algoritmo basado en la red neuronal artificial Perceptrón Multicapa (MLP) (Gardner & Dorling, 1998). Por ser este un algoritmo supervisado se necesita un paso conocido como

entrenamiento. En esta sección se explica cómo se generaron los conjuntos de datos que se utilizarán en la fase del entrenamiento.

2.2.1. Creación de máscaras manuales para la extracción de los píxeles objetivo

A partir de la imagen original marcamos las regiones de interés para obtener los valores en RGB. En las Figuras 1 y 2 se muestra este proceso. La Figura 2 contiene regiones en negro y regiones en blanco. Las regiones en negro son las zonas de interés y están asociadas a los núcleos a reconocer. La imagen en la Figura 2 es la máscara creada.

Figura 1. Imagen original.



Figura 2. Máscara.



2.2.2. Generación de los datos para entrenamiento del modelo y pruebas

Una vez que se obtienen las máscaras manuales, se extrae la información de las intensidades de los canales RGB de la clase de interés (regiones en negro, Figura 2). Los píxeles ubicados en las zonas de interés corresponden a la clase núcleo y se les asigna la etiqueta 1. Al resto de los píxeles se le llamó *clase fondo* y se le asigna la etiqueta 0. Para cada imagen se extrae la misma cantidad de píxeles pertenecientes a la clase núcleo y a la clase fondo, en aras de tener los datos balanceados. Las Tablas 1 y 2 muestran parte de los datos obtenidos (base de datos con formato de almacenamiento csv) usando CRIC y Michoacán, respectivamente. Los valores de intensidad por cada canal de color están normalizados en el rango [0,1]. Se obtuvo un total de 1'277,906 y 3'917,376 registros usando la información en las máscaras procedentes de imágenes CRIC y Michoacán,

respectivamente. El número de registros corresponde al número de renglones en los ficheros csv que se generan.

Tabla 1. Muestras de valores RGB de las clases correspondientes a la base de datos CRIC.

Canal Rojo	Canal Verde	Canal Azul	Etiqueta
0.1215	0.1176	0.2392	1
0.1254	0.1215	0.2247	1
0.1374	0.1254	0.2235	1
0.9764	0.9960	0.9960	0
0.7215	0.7529	0.8117	0
0.9882	0.9960	0.9960	0

Tabla 2. Muestras de valores RGB de las clases correspondientes a la base de datos Michoacán.

Canal Rojo	Canal Verde	Canal Azul	Etiqueta
0.2313	0.2549	0.5607	1
0.2627	0.2745	0.5843	1
0.2823	0.3333	0.6392	1
0.7725	0.8274	0.8274	0
0.7568	0.8196	0.7986	0
0.8039	0.8784	0.8549	0

2.2.3. Exploración visual de los datos

En la Figura 3 se presenta la estimación de densidades por cada canal de color y cada clase (núcleo y fondo) para la base de datos RGB obtenida a partir del conjunto de datos CRIC (Rezende *et al.*, 2021).

La Figura 4 corresponde a la estimación de densidades por cada canal para las clases núcleo y fondo a partir de la base de datos RGB obtenida usando la información del Laboratorio Estatal de Salud Pública del Estado de Michoacán.

Figura 3. Estimación de densidades por cada canal y por cada clase, correspondiente a la base de datos CRIC.

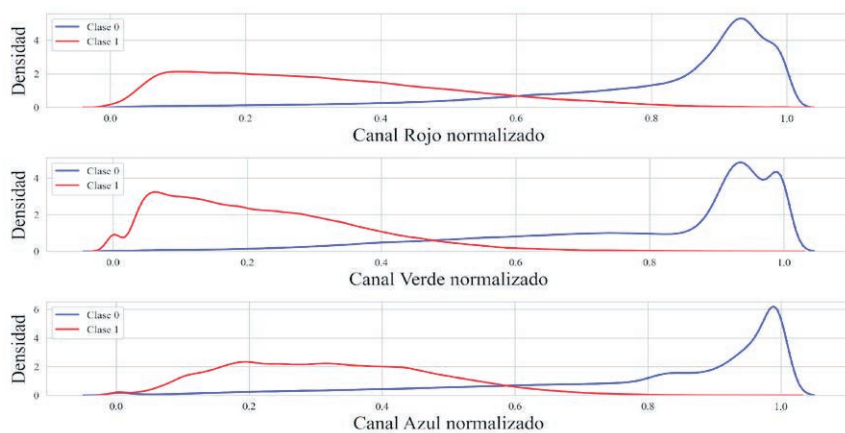
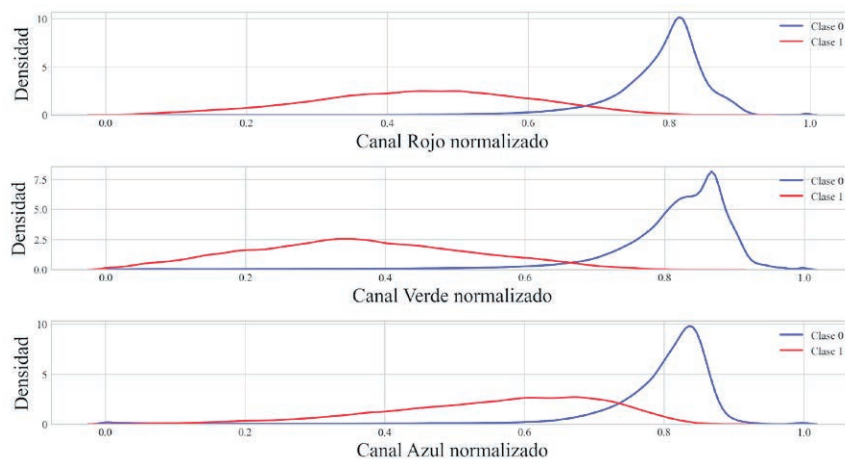


Figura 4. Estimación de densidades por cada canal y por cada clase, correspondiente a la base de datos Michoacán.



Las Figuras 3 y 4 indican que las modas de las intensidades de la clase núcleo (clase 1) en los tres canales (rojo, verde y azul) están ubicadas hacia zonas menos brillantes, mientras que para el fondo las modas se ubican en zonas más intensas.

2.3. Clasificador mlp para los datos CRIC

La configuración usada para el entrenamiento del MLP, al trabajar con los datos generados de CRIC aparece en la Tabla 3.

Tabla 3. Estructura del modelo Perceptrón multicapa y de los datos de entrenamiento para la base de datos CRIC.

Parámetro	Valor
Total de datos	1'277,906
Datos de entrenamiento	575,058
Datos de validación	63,895
Datos de prueba	638,953
Número de parámetros	8,833
Dimensión de entrada	3
Dimensión de salida	1
Número de capas ocultas	2
Nodos por capa oculta	[128,64]
Pérdida	Entropía cruzada binaria
Optimizador	Adam
Tamaño de submuestra	2,048
Tasa de aprendizaje	0.001
Épocas	200
Tiempo de ejecución	160.84 segundos

2.4. Clasificador para la base de datos Michoacán

La configuración usada para el entrenamiento del MLP, al trabajar con los datos generados de Michoacán, aparece en la Tabla 4. En este caso se utilizó la misma estructura del modelo de red neuronal que para la base de datos CRIC, excepto el número de datos para el entrenamiento, prueba y validación.

Tabla 4. Estructura del modelo multicapa y de los datos de entrenamiento para la base de datos Michoacán.

Parámetro	Valor
Total de datos	3'917,376
Datos de entrenamiento	1'762,820
Datos de validación	198,868
Datos de prueba	1'958,688
Número de parámetros	8833
Dimensión de entrada	3
Dimensión de salida	1
Número de capas ocultas	1
Nodos por capa oculta	[128,64]
Pérdida	Entropía cruzada binaria
Optimizador	Adam
Tamaño de submuestra	2048
Tasa de aprendizaje	0.001
Épocas	200
Tiempo de ejecución	480.4 segundos

2.5. Métricas utilizadas para evaluar el desempeño del clasificador

Las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del modelo son:

- Precisión. Se refiere a la proporción predicciones que el modelo clasificó correctamente (Bishop, 2006).

$$Precisión = \frac{(TP+TN)}{Total} \quad (1)$$

TP y TN denotan a verdaderos positivos y verdaderos negativos, respectivamente, y Total, el número total de predicciones, o sea la suma de los TP, los TN, los falsos positivos (FP) y los falsos negativos (FN). Para nuestra tarea, TP denota al número total de píxeles que se clasifican como clase núcleo y sí corresponden a esa clase, mientras que TN indica la cantidad de píxeles clasificados como clase fondo y es cierto. FP y FN denotan a los píxeles mal clasificados para cualquiera de las clases.

- Pérdida. Es la media de cuánto difieren las predicciones del modelo con las etiquetas reales de los datos. El objetivo es minimizar este valor, siempre y cuando no implique el sesgo en el modelo y pierda generalización (Bishop, 2006). La función de pérdida utilizada se muestra en la ecuación (2).

$$\text{Pérdida} = \frac{-1}{N} \sum_{i=1}^N \left((y_i \log(\hat{y}_i) + (1-y_i) \log(1-\hat{y}_i)) \right) \quad (2)$$

- Error absoluto medio (mae por sus siglas en inglés). Mide la magnitud promedio de los errores entre las predicciones del modelo y las etiquetas de los datos (Bishop, 2006).

$$\text{MAE} = \frac{-1}{N} \sum_{i=1}^N (|y_i - \hat{y}_i|) \quad (3)$$

3. Resultados

En esta sección se analizan los resultados del clasificador MLP para la base de datos CRIC y para la de Michoacán.

3.1. Discusión de los resultados del clasificador

MLP para la base de datos CRIC

Las Figuras 5, 6, 7 y 8 muestran gráficamente la evaluación del comportamiento del MLP para los datos en CRIC. En las Figuras 5, 6 y 7 aparecen las gráficas del comportamiento del entrenamiento del MLP para el conjunto de entrenamiento y para el conjunto de validación, según las métricas precisión, pérdida y MAE, (obsérvese ecuaciones 1, 2 y 3). La Figura 8 contiene la ilustración de la matriz de confusión para los datos del conjunto de prueba.

Figura 5. Comportamiento de la precisión durante el entrenamiento.

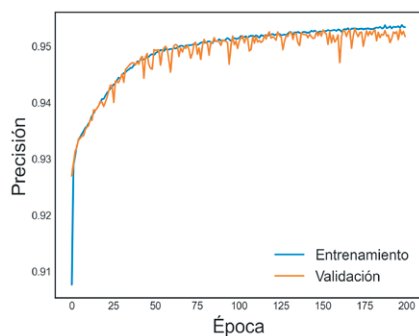


Figura 6. Matriz de confusión de los resultados de la clasificación del conjunto de datos prueba.

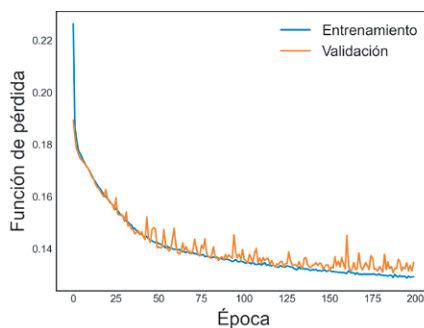


Figura 7. Comportamiento del error promedio absoluto durante el entrenamiento.

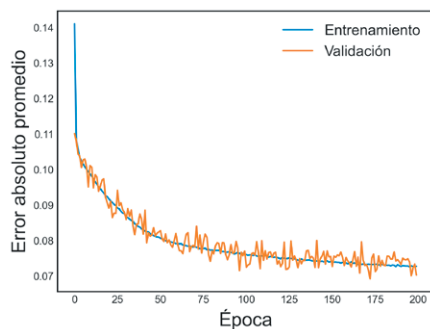
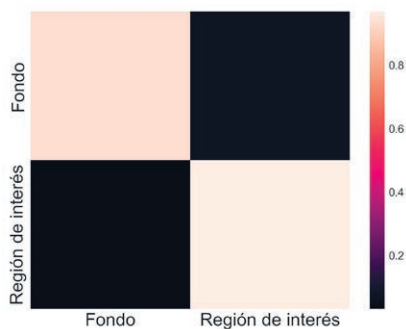


Figura 8. Matriz de confusión de los resultados de la clasificación del conjunto de datos prueba.



La Tabla 5 detalla las métricas obtenidas en la clasificación del conjunto de datos prueba usando la base de datos generada usando CRIC.

Tabla 5. Métricas obtenidas en la clasificación del conjunto de datos prueba de la base de datos CRIC.

Parámetro	Valor
Precisión	0.9256
Pérdida	0.1422
MAE	0.0803

En la Figura 9 se muestra un ejemplo donde se evidencian los errores del clasificador. Las zonas pintadas en rojo corresponden a las regiones que fueron clasificadas como clase núcleo. Obsérvese que hay zonas encerradas en rectángulos negros donde hay píxeles clasificados como núcleo erróneamente (FP). Errores de clasificación, como el que se muestra en la Figura 9, explican el valor de precisión de 92.5%, alcanzado en la base de datos CRIC. Este valor está por debajo del desempeño de los modelos reportados en el estado del arte (Alias *et al.*, 2023; Alquran *et al.*, 2022; Khanarsa & Kitsiranuwat, 2024), para resolver la tarea de reconocimiento de núcleos en células escamosas, por lo que se continuará el trabajo de investigación usando otros modelos de clasificación. Las recientes contribuciones se basan en el uso de redes neuronales artificiales más complejas y en combinaciones de estas con métodos tradicionales de Machine Learning; esto forma parte de la continuación y mejoramiento del trabajo que aquí se reporta.

3.2. Discusión de los resultados del clasificador MLP para la base de datos Michoacán

Las Figuras 10, 11 y 12 muestran el comportamiento del entrenamiento del clasificador MLP para la base de datos Michoacán. La Figura 13 contiene la representación gráfica de la matriz de confusión para los resultados de la clasificación del conjunto de prueba a partir de la base de datos de Michoacán.

Figura 9. Imagen clasificada de la base de datos Michoacán.
Zonas en rojo indican núcleos detectados. Zonas encerradas en rectángulos negros indican núcleos incorrectamente detectados (FP).

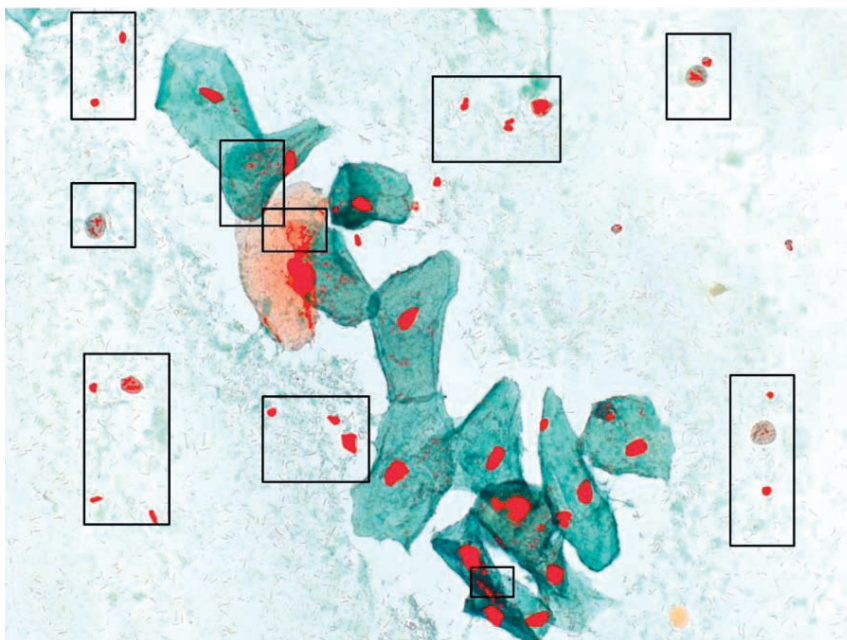


Figura 10. Comportamiento de la precisión durante el entrenamiento.

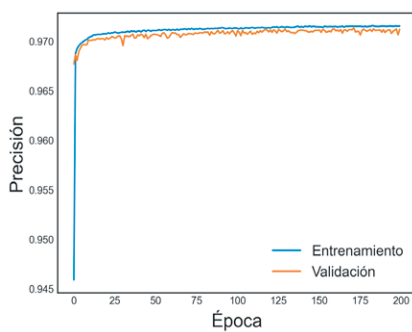


Figura 11. Matriz de confusión de los resultados de la clasificación del conjunto de datos prueba.

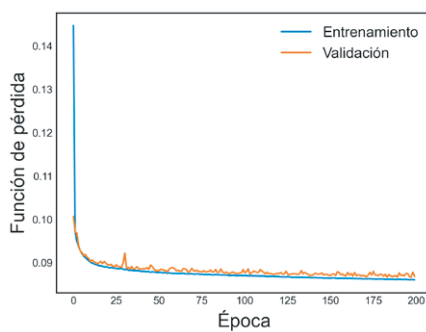


Figura 12. Comportamiento del error promedio absoluto durante el entrenamiento.

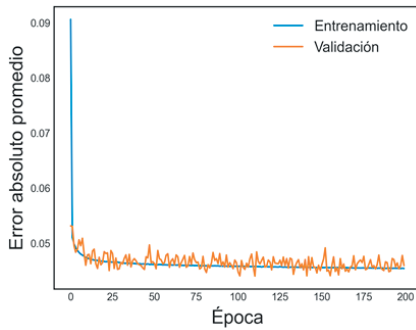
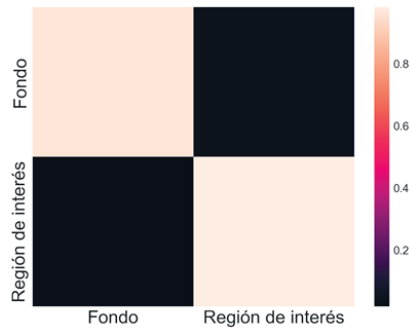


Figura 13. Matriz de confusión de los resultados de la clasificación del conjunto de datos prueba.



La Tabla 6 muestra las métricas obtenidas al clasificar los datos del conjunto de prueba de la base de Michoacán.

Tabla 6. Métricas obtenidas en la clasificación del conjunto de datos prueba de la base de datos de Michoacán.

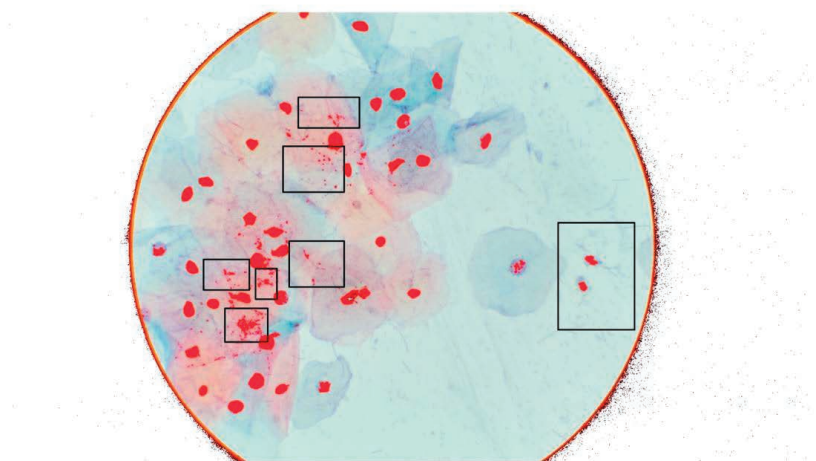
Parámetro	Valor
Precisión	0.9713
Pérdida	0.0863
MAE	0.0456

Como se puede observar en la Tabla 6, para esta base de datos, el desempeño del modelo MLP mejoró de manera significativa, alcanzando un 0.97. Este valor es comparable con lo reportado en el estado del arte al resolver la tarea de reconocimiento de núcleos en células escamosas (Chankong *et al.*, 2014; Khanarsa & Kitsiranuwat, 2024; Somasundaram *et al.*, 2020). El resultado de obtener métricas de mayor valor en la clasificación de las imágenes de Michoacán puede explicarse por el hecho de que las imágenes procedentes de esta base de datos se caracterizan por un menor solapamiento (ligeramente) de las distribuciones de nive-

les de intensidad en los canales rojo, verde y azul para las clases núcleo y fondo (obsérvese Figuras 3 y 4), en comparación con lo que sucede en las distribuciones de las clases fondo y núcleo para la base de datos CRIC.

En la Figura 14 se observa el resultado de la clasificación. Las áreas de color rojo fueron las que el clasificador identificó como núcleo. Las áreas encerradas en rectángulos negros indican áreas clasificadas de manera errónea como clase núcleo. Estas regiones mal clasificadas pertenecen a los falsos positivos (FP) y tiene repercusión negativa en el desempeño del clasificador, así como la confiabilidad de los resultados.

Figura 14. Imagen de la base de datos Michoacán procesada en el clasificador. Zonas en rojo indican núcleos detectados. Zonas encerradas en rectángulos negros indican núcleos incorrectamente detectados (FP).



Al igual que en el caso de la base de datos CRIC, es necesario mejorar el comportamiento del clasificador y como parte del trabajo futuro se propone usar mayor número de características y usar redes neuronales más complejas como las convolucionales, así como combinación de estas con métodos tradicionales de Machine Learning (Alias *et al.*, 2023; Khanarsa & Kitsiranuwat, 2024; Yaman & Tuncer, 2022; Youneszade *et al.*, 2023).

4. Conclusiones

El trabajo presentado forma parte de un proyecto de tesis doctoral para la identificación automática de núcleos en aras de contar el número de células escamosas presentes en una imagen proveniente de citología de cuello y así reducir los tiempos de revisión de las muestras. Aunque se presenta un modelo simple, la experimentación permitió observar y comprender la complejidad de las imágenes de estudio y de los algoritmos a implementar. Como trabajo futuro, se pretende utilizar redes neuronales convolucionales como principal método, añadiendo también otras técnicas de inteligencia artificial y de procesamiento digital de imágenes con Machine Learning.

Referencias

- Alias, N. A., Mustafa, W. A., Jamlos, M. A., Ismail, S., Alquran, H. & Rohani, M. N. (2023). Pap Smear Image Analysis Based on Nucleus Segmentation and Deep Learning-A Recent Review. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 29(3), 37-47.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Bogani, G., Sopracordevole, F., Ciavattini, A., Vizza, E., Vercellini, P., Giannini, A., Ghezzi, F., Scambia, G., Raspagliesi, F., Di Donato, V. et al. (2023). Duration of Human Papillomavirus Persistence and Its Relationship with Recurrent Cervical Dysplasia. *European Journal of Cancer Prevention*, 32(6), 525-532.
- Chankong, T., Theera-Umpon, N. & Auephanwiriyakul, S. (2014). Automatic Cervical Cell Segmentation and Classification in Pap Smears. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 113(2), 539-556. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.12.012>
- Corkum, M. T., Shaddick, H., Jewlal, E., Patil, N., Leung, E., Sugimoto, A., McGee, J., Prefontaine, M. & D'Souza, D. (2019). When Pap Testing Fails to Prevent Cervix Cancer: A Qualitative Study of The Experience of Screened Women under 50 with Advanced Cervix Cancer in Canada. *Cureus*, 11(1).
- Dasgupta, S. (2023). The Efficiency of Cervical Pap and Comparison of Conventional Pap Smear and Liquid-Based Cytology: A Review. *Cureus*, 15(11).
- Gardner, M. W. & Dorling, S. R. (1998). Artificial Neural Networks (the Multi-layer Perceptron)-A Review of Applications in the Atmospheric Sciences. *Atmospheric Environment*, 32(14), 2627-2636. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00447-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00447-0)
- Liang, L. A., Einzmann, T., Franzen, A., Schwarzer, K., Schauburger, G., Schriener, D., Radde, K., Zeissig, S. R., Ikenberg, H., Meijer, C. J. et al. (2021). Cervical Cancer Screening: Comparison of Conventional Pap Smear Test, Liquid-Based Cytology, and Human Papillomavirus Testing as Stand-Alone or Cotesting Strategies. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 30(3), 474-484.

- Lu, J., Han, S., Na, J., Li, Y., Wang, J. & Wang, X. (2023). The Correlation between Multiple hpv Infections and the Occurrence, Development, and Prognosis of Cervical Cancer. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1220522.
- Regional Committee for Europe, 72nd session. (2022). *Seventy-second Regional Committee for Europe: Tel Aviv, 12-14 September 2022: Roadmap to accelerate the elimination of cervical cancer as a public health problem in the WHO European Region 2022-2030* (p. 8). World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Regional Committee for the Western Pacific, 073. (2022). *Cervical cancer* (p. Provisional agenda item 10). who Regional Office for the Western Pacific.
- Rezende, M. T., Silva, R., Bernardo, F. de O., Tobias, A. H., Oliveira, P. H., Machado, T. M., Costa, C. S., Medeiros, F. N., Ushizima, D. M., Carneiro, C. M. et al. (2021). CRIC Searchable Image Database as A Public Platform for Conventional Pap Smear Cytology Data. *Scientific Data*, 8(1), 1-8.
- State Laboratory of Public Health of Michoacán State. (2024).
- Youneszade, N., Marjani, M. & Pei, C. P. (2023). Deep Learning in Cervical Cancer Diagnosis: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges. *IEEE Access*, 11, 6133-6149. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3235833>

2. Monitoreo inalámbrico de parámetros físico-químicos en cuerpos de agua

Héctor Huerta Avila¹

María Alejandra Carreón Alvarez¹

Marciano Sanchez Tizapa¹

Rocío Castañeda Valderrama¹

Miriam Marcela Tostado Plascencia¹

Resumen

En este capítulo se presenta un sistema para medir parámetros físico-químicos en cuerpos de agua. El sistema está compuesto por un cuerpo flotante que gestiona todo el proceso en el sistema, una sonda sumergida para realizar la medición de profundidad variable y una interfaz de usuario para recibir y guardar los datos en un servidor. El cuerpo flotante y la sonda sumergida son dos sistemas electrónicos independientes. La interfaz de usuario se desarrolló en MATLAB. Se presenta un nuevo protocolo de comunicación, basado en ancho de pulso, capaz de transmitir tramas de datos con bytes codificados en ASCII utilizando una sola línea de transmisión. El sistema puede medir variables físico-químicas en el agua y transmitir la información a un servidor que la guarda. Los parámetros en el sistema se pueden cambiar, como la hora, fecha y hora de la muestra, mediante la interfaz de usuario o en un dispositivo móvil. El sistema fue probado en un cuerpo de agua para medir temperatura, pH, conductividad, salinidad y SST, mostrando buen desempeño.

Palabras clave: cuerpos de agua, protocolo de comunicación, sistemas electrónicos digitales.

¹ Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, Carretera Guadalajara-Ameca km. 45.5, C.P. 46600, Ameca, Jalisco, México, hector.huerta@valles.udg.mx

1. Introducción

La contaminación del agua es un problema a nivel mundial, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), al menos dos mil millones de personas beben agua contaminada habitualmente. Este riesgo es aún mayor en áreas rurales, debido a que no existen plantas de tratamiento o sistemas de monitoreo de la calidad del agua, donde la que está contaminada se utiliza para consumo humano, para el riego de cultivos y para consumo del ganado (WHO, 2019). Por esto, es necesario contar con herramientas tecnológicas para medir la calidad del agua de manera continua (Gozzi *et al.*, 2019).

Uno de los principales problemas relacionados con los cuerpos de agua es el monitoreo de variables físico-químicas que indican la calidad del agua; por ejemplo, potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto, potencial de oxidación-reducción, temperatura, color, turbidez, entre otros. El monitoreo suele realizarse utilizando métodos tradicionales, es decir, se toman muestras directamente de los cuerpos de agua, mismas que son analizadas en un laboratorio, lo que hace que esta técnica sea compleja y costosa, además de no ofrecer resultados inmediatos. Para evitar estas dificultades, se pueden colocar sensores directamente en los cuerpos de agua (Criollo *et al.*, 2019).

Una de las técnicas para el monitoreo de los cuerpos de agua son las boyas, que se instalan como cuerpos flotantes y cuentan con sensores para el monitoreo (Morse *et al.*, 2017; Osorio *et al.*, 2019; Siadatmousavia & Miot, 2016). Hay boyas comerciales, como las de la empresa Xylem, que ofrece un dispositivo que mide la temperatura, el pH, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad y salinidad; estos datos son enviados a un servidor. Las boyas representan una opción adecuada para el monitoreo; sin embargo, se presentan en tamaños grandes, además de requerir software propietario. Algunas publicaciones muestran partes requeridas para implementar una boya (Mueller *et al.*, 2013). Finalmente, uno de los principales problemas de las boyas es la comunicación entre los diferentes elementos, en particular, cuando se tienen elementos sumergidos a diferentes profundidades.

Se han desarrollado diversos protocolos para la transferencia de datos entre diferentes dispositivos electrónicos, entre los que se pueden mencionar Serial Interface Protocol (Di Jasio *et al.*, 2008) y el protoco-

lo Inter Integrated Circuits (Wilmschurst, 2007), los cuales presentan alta confiabilidad, con las limitaciones de la distancia. Con el protocolo Controller Area Network se puede incrementar la distancia de transmisión, aunque se requieren dos líneas de transmisión, con reglas de comunicación más complejas (Cena *et al.*, 2019). Para reducir la cantidad de líneas de transmisión, la opción es el protocolo One-wire, de la empresa Dallas Semiconductor (Di Jasio *et al.*, 2008); no obstante, la transmisión requiere de ocho pulsos para cada *byte*, lo que reduce la confiabilidad, debido a que algún pulso se puede perder en algún paquete.

En este capítulo, se presenta un sistema para el monitoreo de variables físico-químicas en cuerpos de agua, incluyendo un protocolo de comunicación innovador, llamado Pulse Width Protocol (PWP), que permite la comunicación entre dos o más dispositivos electrónicos digitales. El protocolo propuesto requiere solamente un cable para la comunicación, para reducir la cantidad de *hardware* en el sistema completo. El protocolo se ha probado en distancias de hasta treinta metros, con resultados satisfactorios. El PWP fue desarrollado para la comunicación entre los dos elementos principales de una boya propuesta: un cuerpo flotante y una sonda sumergida, los cuales se interconectan con tres cables, dos para alimentación y uno para comunicación. El cuerpo flotante y la sonda sumergida son dos sistemas electrónicos digitales independientes, cada uno cuenta con su propio microcontrolador. El sistema propuesto es capaz de medir temperatura, pH, conductividad, salinidad y sólidos suspendidos totales (SST). Las variables son medidas en tiempo real con el muestreo definido por el usuario, la fecha y hora también son modificables. Los datos adquiridos, incluyendo fecha y hora, se envían a un servidor mediante el Sistema Global de Comunicaciones Móviles (del término en inglés Global System for Mobile communications, GSM). El servidor corresponde a una computadora con un módulo GSM adicional, donde los datos son recibidos y guardados para un futuro procesamiento. Con el GSM es posible transmitir la información a todo el mundo, sin limitación de distancia. Se desarrolló una aplicación para el servidor en MATLAB con una interfaz de usuario. El sistema propuesto fue probado en un pequeño cuerpo de agua, donde mostró buenos resultados en la medición y transmisión de los datos al servidor de forma estable, sin pérdida

de información. El sistema resultante es más compacto y económico que los sistemas comerciales y tiene la flexibilidad de incluir más sensores.

2. Descripción del sistema

El sistema de medición de parámetros físicos en agua se desarrolló tomando en cuenta los problemas para realizar las mediciones en cuerpos de agua y la disponibilidad de la información. En esta sección, en primer lugar, se presenta el PWP. Después, se describe el sistema completo. Finalmente, se muestran algunas observaciones importantes.

2.1 Pulse-Width Protocol

El PWP fue desarrollado para transmitir datos digitales entre transceptores en diferentes sistemas electrónicos digitales. Los transceptores transmiten y reciben información; se basan en un sistema embebido con microcontroladores y los componentes necesarios para su funcionamiento. Cada transceptor se constituye de un microprocesador, un oscilador, un módulo de transmisión y un módulo de recepción.

El PWP utiliza un transceptor maestro y varios transceptores esclavos, se pueden tener hasta 256 transceptores esclavos. Para cada transceptor esclavo se define una dirección. Los datos transmitidos se organizan en una trama de datos, que consta de una serie de *bytes* en una fila de *n* posiciones. Para establecer comunicación entre el transceptor maestro y un transceptor esclavo, el maestro envía un primer *byte* codificado que corresponde a la dirección del transceptor esclavo, de tal manera que únicamente el transceptor con la dirección correspondiente atiende el mensaje. El transceptor esclavo recibe y guarda de forma secuencial los datos en el buffer de recepción para integrar una trama de datos. Después, la trama de datos se envía al decodificador para obtener la información transferida desde el transceptor maestro. La trama de datos puede contener varios *bytes*, según las necesidades de transmisión. Se incluye un carácter para definir el fin de la transmisión. Los *bytes* se transmiten mediante el protocolo PWP, que codifica cada *byte* a través del ancho de un pulso. El PWP es un protocolo *half-duplex* que permite la comunicación entre transceptores a través de un solo cable. Los datos se envían mediante una señal cuadrada, con un periodo bajo constante y un estado alto variable, donde se definen diez valores altos diferentes.

Se requieren tres pulsos para codificar un *byte*, teniendo en cuenta el código ASCII: el primer pulso representa las centenas, el segundo pulso, las decenas, y el tercer pulso, las unidades.

Cada *byte* codificado se separa por un periodo constante. El ancho de pulso para cada *byte* codificado depende de la información a transmitir. Se considera un ancho de pulso bien definido para el valor cero, otro ancho de pulso para el valor uno, hasta llegar al diez. La trama de datos completa a transmitir se organiza en una cadena de *n bytes*, donde *n* es la cantidad de caracteres en la trama de datos. La transmisión comienza con el *byte* en la posición 1, luego se transmite el *byte* en la posición 2 y así sucesivamente, hasta el carácter *n*. Finalmente, se envía el carácter correspondiente al final de la transmisión.

Para ejemplificar el protocolo, se utilizará la codificación de la palabra "Test". Los valores decimales correspondientes en el código ASCII para la palabra "Test" se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores decimales en el código ASCII de la palabra "Test".

Carácter	Valor ASCII
T	084
e	101
s	115
t	116
End of transmission (EOT)	004

Como se mencionó, se definen diez valores diferentes de ancho de pulso, en este ejemplo, se definió un incremento de 1 ms para cada nivel, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Ejemplo de ancho de pulso para los valores de 0 a 10.

Valor	Ancho de pulso
1	1 ms
2	2 ms
3	3 ms

Valor	Ancho de pulso
4	4 ms
5	5 ms
6	6 ms
7	7 ms
8	8 ms
9	9 ms
0	10 ms

Para el ejemplo considerado, la trama de datos enviada desde el micro-procesador al buffer de transmisión será:

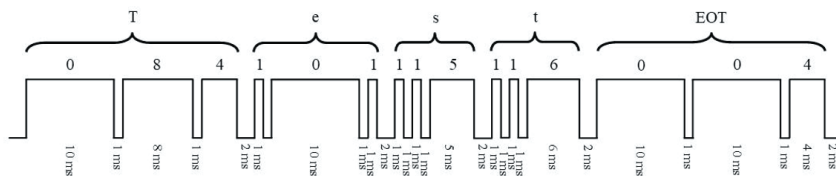
T-e-s-t-EOT,

donde EOT es un carácter de fin de transmisión. Lo anterior se expresa en el código ASCII de la forma:

084-101-115-116-004

Si se considera un periodo entre pulsos de 2 ms y un periodo en estado bajo de 1 ms, sabiendo que cada carácter está codificado con tres pulsos, correspondiente al valor decimal en el código ASCII, el tren de pulsos que se transmitirá después del proceso de codificación se presenta en la Figura 1.

Figura 1. Tren de pulsos para la transmisión de la palabra "Test".



Es importante mencionar que debido a que la comunicación se realiza mediante una sola línea de transmisión, se necesita un solo pin de comunicación, en este caso un pin de entrada/salida del microprocesador,

el cual debe conmutarse entre salida para transmisión y entrada para recepción.

2.2. Sistemas electrónicos

El sistema de medición de parámetros en el agua está compuesto por un cuerpo flotante, colocado sobre la superficie del agua y una sonda sumergida. El cuerpo flotante es una caja hermética que contiene una placa electrónica con un microcontrolador Microchip PIC18F46K22, una placa de comunicación, una placa de administración de energía, un panel solar y un juego de baterías. Como el sistema está diseñado para ser instalado en cuerpos de agua, sin supervisión y fuente de energía fija, el cuerpo flotante se alimenta con baterías y un panel solar para garantizar una fuente de voltaje ininterrumpida. El microcontrolador gestiona las operaciones realizadas en el proceso de toma de medidas y transmite la información a un servidor en tiempo real. La placa de comunicación manda los datos al servidor mediante GSM, con mensajes de texto, que permite obtener la información sin límites de distancia. Cada conjunto de mediciones se envía mediante un mensaje al servidor. Es posible configurar la fecha, hora y periodo de muestreo mediante SMS (las siglas del inglés Short Message Service) con una sintaxis definida. La comunicación con la sonda sumergida se gestiona con el microcontrolador, mediante el PWP. Cada vez que se realiza un muestreo, el microcontrolador envía una solicitud a la sonda sumergida, luego se reciben los datos, en este caso las variables medidas; es decir, temperatura, pH, SST, conductividad y salinidad.

Por otro lado, la sonda sumergida es una caja hermética y está compuesta por una tarjeta eléctrica con un microcontrolador Microchip PIC-18F46K22, así como sondas individuales para medir temperatura, pH, SST, conductividad y salinidad. Cada sonda dispone de una tarjeta electrónica de acondicionamiento de señales independiente, excepto la sonda de temperatura. La sonda sumergida se alimenta desde el cuerpo flotante, por lo que se necesita una única fuente de voltaje en todo el sistema. La comunicación con el cuerpo flotante es a través del microcontrolador. Cuando la sonda sumergida recibe una solicitud, se realiza la medición en todos los parámetros: temperatura, pH, SST, conductividad y salinidad. Después, el microcontrolador envía los valores medidos al cuerpo flotante, mediante el PWP. El sistema completo se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Sistema propuesto.



Debido a que los parámetros del agua varían con la profundidad en la medición, la sonda sumergida se coloca a diferentes profundidades, para tomar la medición correspondiente. En el caso del sistema presentado, la sonda sumergida se puede posicionar hasta doce metros bajo la superficie del agua. Para reducir el peso y el *hardware* requerido, se utilizaron solo tres cables para la interconexión del cuerpo flotante y la sonda sumergida; dos para alimentación de voltaje y uno para comunicación, esto es posible gracias al PWP.

2.3 Interfaz de usuario

Los mensajes provenientes del sistema de monitoreo propuesto se envían a un servidor, en este caso, una computadora que deberá tener conectado, en un puerto USB, un módulo de comunicación para recibir los mensajes vía GSM. La interfaz de usuario se implementó en MATLAB, aprovechando la simplicidad para acceder a los puertos de la computadora, guardar la información y generar informes. La aplicación tiene dos botones, para conectar y desconectar el módulo de comunicación, en un puerto específico. Además, la interfaz recibe un conjunto de datos cada

vez que se muestra, o se puede enviar una solicitud al cuerpo flotante, de forma arbitraria, con un botón. La fecha y la hora en el cuerpo flotante se modifica con dos botones. Finalmente, se muestran los datos recibidos, incluida la fecha y la hora. Los datos se guardan en un archivo de valores separados por comas (csv). La interfaz se compiló en un archivo ejecutable, de tal manera que no es necesario tener MATLAB en la computadora que se utilizará para el almacenamiento de los datos. La interfaz se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Interfaz de usuario.



1.4 Características esenciales

El sistema de monitoreo propuesto cuenta con características destacables, mismas que se presentan a continuación:

- El PWP es un protocolo asíncrono, no se requiere un oscilador para controlar la frecuencia o la fase de las señales portadoras de los datos transmitidos. Esta característica permite reducir el número de líneas de transmisión, ya que no es necesaria una señal de reloj.
- Con la configuración propuesta, se puede interconectar un transceptor maestro con hasta 256 transceptores esclavos. Además, es posible aumentar el número total de transceptores, incrementando el número de *bits* utilizados para codificar la dirección.

- Aunque el PWP se presenta con un solo transceptor maestro, el número incrementa asignando una dirección a cada transceptor maestro e implementando la dirección codificada en el procedimiento de transmisión de los transceptores esclavos.
- La transmisión se realiza por dos líneas de transmisión, una de datos y otra de referencia. Esta característica simplifica y reduce el *hardware* requerido para la transmisión entre dos o más sistemas electrónicos digitales. Se conserva la configuración de dos líneas, para cualquier número de transceptores maestros o esclavos.
- Se pueden transmitir diferentes solicitudes desde el transceptor maestro a los transceptores esclavos, en forma de comandos. Por ejemplo, se aplica un comando para pedirle al transceptor esclavo que realice una tarea específica en el microprocesador o que solicite datos.
- El PWP permite un sistema de comunicación distribuida, ya que los transceptores pueden estar ubicados en la misma placa electrónica, en diferentes placas electrónicas, en el mismo sistema o en diferentes sistemas, lo que añade una gran flexibilidad al sistema de comunicación.
- La comunicación a través del PWP requiere un número reducido de elementos de *hardware*, debido a la simplicidad del protocolo, lo que da como resultado transceptores compactos.
- El procedimiento de transmisión permite enviar tramas de datos con varios caracteres, números o información, codificando de la misma forma. El usuario tiene la flexibilidad de enviar diferentes tipos de información utilizando el mismo protocolo.
- El sistema de monitoreo completo es más pequeño que los sistemas comerciales, lo que posibilita instalar el sistema en masas de agua pequeñas o con poca profundidad.
- El tiempo de muestreo, datos y hora, se puede configurar de forma remota, mediante la interfaz gráfica o directamente con un dispositivo móvil, enviando un SMS con la configuración deseada.
- Aunque las variables se miden y envían al servidor cada vez que se muestra, existe la posibilidad de enviar una solicitud en cualquier momento, desde la interfaz de usuario en el servidor o desde un dispositivo móvil.

- Debido a la configuración presentada, la sonda sumergida tiene profundidad variable, lo que permite realizar las mediciones en diferentes profundidades. Esto gracias a la aplicación del PWP en el sistema que requiere sólo tres cables para la conexión entre el cuerpo flotante y la sonda sumergida.

3. Resultados

Con el fin de reducir el *hardware* requerido por la comunicación entre el cuerpo flotante y la sonda sumergida y simplificar el proceso de comunicación, se implementó el PWP. Las variables medidas fueron temperatura, pH, SST, conductividad y salinidad. El sistema completo se instaló en cuerpo de agua de pequeñas dimensiones, para tener un entorno relevante. El ancho de pulso para las diez combinaciones requeridas se definió de acuerdo con las características del temporizador en el PIC-18F46K22 y se presentan en la Tabla 3. Además, el periodo en estado bajo y el periodo entre pulsos codificados se definieron como 2 ms y 2.5 ms, respectivamente.

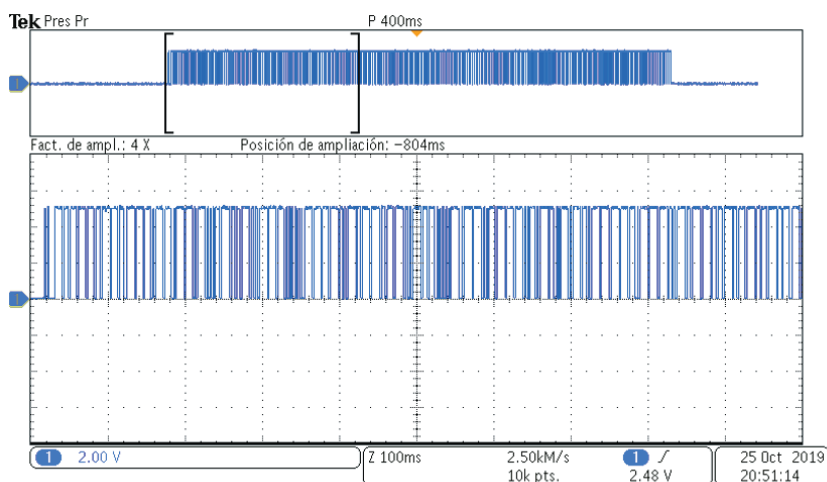
Tabla 3. Ancho de pulso definido para los valores de 0 a 10.

Valor	Ancho de pulso
1	1.29 ms
2	2.17 ms
3	3.2 ms
4	4.2 ms
5	5.2 ms
6	6.27 ms
7	7.30 ms
8	8.2 ms
9	9.2 ms
0	10.25 ms

Considerando el PWP en el sistema de medición de parámetros en agua, cada vez que se toma una muestra, el microprocesador del cuerpo flotante solicita a la sonda sumergida los valores de las variables en el agua. La dirección se envía en dos pulsos con un ancho de pulso de un ms. Después, el microprocesador en la sonda sumergida realiza la medición de temperatura, pH, conductividad, salinidad y SST e integra la trama de datos, que se transmite al cuerpo flotante; el tren de pulsos completo se muestra en la Figura 4. Finalmente, la sonda flotante envía el mensaje completo al servidor, en el formato siguiente:

CUValles, boya 1: Conductividad 518.50, SST 280.00, Salinidad 0.25, Temperatura 28.81, pH 10.80, Fecha: "19/07/10, 21:18:52".

Figura 4. Ejemplo de la trama de datos del sistema para medición de parámetros en agua.



El sistema propuesto se habilitó durante un periodo de más de 37 horas, donde se obtuvieron un total de 447 muestras, con un periodo de muestreo de 5 minutos.

Se puede resaltar cómo con el PWP se logró la comunicación entre dos sistemas electrónicos digitales. En este caso se interconectaron dos microcontroladores, para transferir las medidas de variables físicoquímicas en un

cuerpo de agua de pequeñas dimensiones. La conexión entre el cuerpo flotante y la sonda sumergida se realizó con tres cables; dos de ellos se utilizaron para alimentar a la sonda sumergida y el otro para transmitir datos entre ambos elementos, comprobando que es posible la comunicación con una única línea de transmisión entre diferentes placas electrónicas. El sistema propuesto estuvo transmitiendo datos durante más de 37 horas, lo que demuestra la estabilidad para funcionar de forma continua durante un periodo considerable. Este hecho es importante, ya que los sistemas de comunicación modernos requieren una gran robustez.

Durante el periodo de prueba se recibieron todos los paquetes de datos en cada periodo de muestreo, mostrando una buena confiabilidad y efectividad, ya que la información no se perdió. El sistema de medición de parámetros en agua fue probado en un ambiente relevante, es decir, fuera de un laboratorio, con condiciones reales de operación, lo que demuestra la robustez. Con el esquema propuesto es posible incluir más sensores, según los requerimientos del usuario y los parámetros deseados. Por último, mencionar que la interfaz de usuario funcionó satisfactoriamente durante el periodo de prueba, mostrando una buena estabilidad en el cuerpo flotante y la sonda sumergida.

Con respecto al PWP, fue capaz de establecer comunicación entre dos o más sistemas electrónicos digitales con la posibilidad de utilizar comandos para solicitar información entre transceptores, donde la transmisión del transceptor esclavo comienza con la petición del maestro transceptor, dado por dos pulsos de un metro. Adicionalmente, destacamos que el protocolo propuesto requiere un bajo costo computacional, en el sistema de medición de parámetros se utilizó el microcontrolador PIC-18F46K22, con un microprocesador de ocho *bits*, oscilador de 64MHz y arquitectura Harvard. A pesar de las características de procesamiento limitadas, la transmisión se realizó satisfactoriamente.

4. Conclusiones

Se presentó un sistema completo para medir parámetros físico-químicos en cuerpos de agua. El sistema incluye una sonda sumergida para realizar mediciones de variables en cuerpos de agua, un cuerpo flotante para gestionar el proceso de medición y comunicación, un nuevo protocolo de comunicación con una única línea de transmisión y una interfaz grá-

fica para un servidor. El servidor es capaz de medir el valor de variables a profundidades distintas en tiempo real, así como transmitir la información sin limitación de distancia. La información se guarda en el servidor, de forma continua. El sistema y el protocolo no se limitan a cuerpos de agua, se pueden implementar en otras aplicaciones, como sondas de pozos profundos, estaciones meteorológicas, etcétera. Además, es posible incluir otros sensores, dependiendo de los requerimientos del usuario.

Referencias

- Cena, G., Bertolotti, I. C., Hu, T. & Valenzano, A. (2019). On a Software-defined CAN Controller for Embedded Systems. *Computer Standards & Interfaces*, 63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csi.2018.11.007>
- Criollo, R., Velasco, V., Nardi, A., De Vries, L. M., Riera, C., Scheiber, L., S Jurado, A., Brouyère, S., Pujades, E. Rossetto, R. & Vázquez-Suñé, E. (2019). AkvaGIS: An Open Source Tool for Water Quantity and Quality Management. *Computer & Geosciences*, 127, 123-132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.012>
- Di Jasio, L., Wilmschurst, T., Ibrahim, D., Morton, J., Bates, M., Smith, J., Smith, D. & Hellebuyck, C. (2008). *PIC Microcontrollers, Know it all*. Elsevier.
- Gozzi, C., Filzmoser, P., Bucciatti, A., Vaselli, O. & Nisi, B. (2019). Statistical Methods for the Geochemical Characterisation of Surface Waters: the Case Study of the Tiber River Basin (Central Italy). *Computer & Geosciences*, 131, 80-88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.011>
- Morse, P., Reading, A. & Lueg, C. (2017). Animated Analysis of Geoscientific Datasets: An Interactive Graphical Application. *Computer & Geosciences*, 109, 87-94. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.006>
- Mueller, P., Thoss, H., Kaempf, L. & Güntner, A. (2013). A Buoy for Continuous Monitoring of Suspended Sediment Dynamics. *Sensors*, 13(10), 13779-13801. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/10/13779>
- Osorio, A. F., Montoya Vargas, S., Cartagena, C. A., Espinosa, J., Orfila, A. & Winter, C. (2019). Virtual buoy: A Video-based Approach for Measuring Near-shore Wave Peak Period. *Computer & Geosciences*, 133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.07.006>
- Siadatmousavia, S. M., Jose, F. & Miot da Silva, G. (2016). Sensitivity of a Third Generation Wave Model to Wind and Boundary Condition Sources and Model Physics: A Case Study from the South Atlantic Ocean off Brazil Coast. *Computer & Geosciences*, 90(Part B), 57-65. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.025>
- Wilmschurst, T. (2007). *Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers*. Elsevier.
- World Health Organization. (2019). Drinking-water. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

3. Análisis de índices de rendimiento escolar de Ingeniería en Geofísica del CUValles, Universidad de Guadalajara

César Calderón Mayorga¹

Francisco Eduardo Oliva Ibarra¹

Claudia Janet Amparo Torrealba García¹

Marco Antonio Gómez Herrera¹

Resumen

Los índices de rendimiento escolar permiten identificar la situación y problemáticas de una carrera. Con este estudio se buscó analizar los índices de la Ingeniería en Geofísica del CUValles y tener elementos para tomar decisiones en este rubro. Se consultó y analizó información en el Sistema de Integral de Información y Administración Universitaria de las cohortes comprendidas entre los ciclos 2017B y 2023A, los 150 estudiantes, trayectoria académica, materias no aprobadas y semestre en el que se desertaron. Se identificó el ingreso total, los activos, bajos porcentajes de egreso y titulación, elevada deserción y materias con alta reprobación, siendo estas las problemáticas identificadas, partiendo de los índices de rendimiento escolar, lo que posibilita establecer estrategias para su atención y la toma de decisiones.

Palabras clave: cohorte, estudiantes activos, egreso, deserción, reprobación, titulación.

¹ Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, Carretera Guadalajara-Ameca km. 45.5, C.P. 46600, Ameca, Jalisco, México.

Introducción

En México se consideran diversos indicadores académicos para valorar el buen desempeño de una universidad, al igual que el de un programa educativo y de los estudiantes. A estos indicadores se les conoce como *índices de rendimiento escolar*, en ellos se incluyen la eficiencia terminal, la retención, el rezago, la deserción, la reprobación y la titulación, los cuales también suelen considerarse en los procesos de acreditación de los programas educativos, en particular de las ingenierías. La constante revisión de estos indicadores permite identificar posibles problemáticas y en su momento darles atención, no hacerlo afectaría la formación profesional de los estudiantes y no se estarían cumpliendo los fines por los que se abrió un programa educativo ni tampoco los de la institución. En este sentido, estos indicadores permiten conocer la calidad de las instituciones de educación superior, diagnosticar y medir el impacto de la educación que se proporciona a los estudiantes (Rodríguez *et al.*, 2021), además de que a partir de ellos se pueden elaborar alternativas para fortalecer el funcionamiento de la universidad.

Vanegas y Sancho (2019), señalan que estos índices permiten conocer la calidad de las instituciones de educación superior, y los estudios de seguimiento de las cohortes dan oportunidad de valorar la formación académica y las causas de la deserción a nivel universitario. Por su parte, Castro y colaboradores (2023), consideran que el seguimiento de estos indicadores busca promover la autoevaluación, mejorar la calidad y favorecer los procesos de acreditación.

En este sentido, Pérez (2017) afirma que el seguimiento de la trayectoria escolar constituye una herramienta que permite analizar estos indicadores para incidir en la planeación y evaluación de la educación superior buscando la mejora de los programas educativos, pero sobre todo la adecuada formación de los estudiantes para que concluyan con éxito su carrera. También, se ha señalado (Sperling *et al.*, 2024) la importancia de reclutar y retener a los estudiantes de las ingenierías, siendo esto un reto. De acuerdo con Liu y colaboradores (2023), la trayectoria de los estudiantes universitarios se ve afectada por diversos factores, entre ellos los de carácter personal y los del entorno; agregan que entre los factores personales destacan el género, la edad, la raza y en los del entorno, los

hermanos y hermanas, el nivel de educación de los padres, además de la ubicación de su lugar de origen.

Con relación a la eficiencia terminal, para la Secretaría de Educación Pública de México (SEP, 2019), este indicador compara la cantidad de alumnos que ingresaron con los que egresaron de una cohorte. A su vez, una cohorte es definida por Domínguez y colaboradores (2014) como el grupo de estudiantes que iniciaron sus estudios al mismo tiempo, en el caso del presente análisis, corresponde a estudiantes de la misma carrera. Por su parte, esta misma SEP define la retención como el número de alumnos que permanecen estudiando de una cohorte.

De igual manera, se establece que la reprobación es el número de alumnos que no ha obtenido los conocimientos en los programas de estudio, esto lo podemos apreciar en nuestro caso con las calificaciones; en tanto que para Núñez (2020), la deserción es el abandono de la universidad en cualquier momento de su vida académica.

De acuerdo con Rico y Gaytán (2022), la reprobación y la deserción escolar son dos de los mayores problemas de las instituciones educativas, ocasionado por el bajo rendimiento académico, lo que a su vez ocasiona reprobación y esta, la deserción. En esa línea, para Núñez (2020), la deserción es un problema en países desarrollados y en vías de desarrollo, está presente en todas las universidades en mayor o menor proporción, y es ocasionada por factores diversos. En tanto, se afirma (Miranda et al., 2021) que es consecuencia de la pérdida de interés y de vinculación con los estudios.

Por su parte, se señala (Tayebi et al., 2021) que en las ingenierías los índices de deserción son un problema que preocupa en muchos países, ocasionando dificultades para atender la demanda de profesionales de estas áreas y un impacto económico negativo. Además, afirman que la mayor deserción ocurre durante el primer año de estudios, lo cual lo atribuyen a que se tomó una decisión incorrecta al elegir la carrera; sin embargo, identifican más factores que inciden en la deserción, entre ellos demográficos, financieros, motivacionales, académicos e institucionales.

En cuanto a la reprobación, Rico y Gaytán (2022) afirman que puede disminuirse en carreras de ingeniería si se tiene información oportuna de los estudiantes en peligro de reprobación, y en general, de su desempeño académico. Con relación a ello, se considera (Tormon et al., 2023) que el

primer año de los estudiantes de ingeniería representa retos por la transición que experimentan al ingresar a un programa de nivel profesional.

Sin duda, en el caso de las ingenierías hay una gran diversidad de factores que inciden en los índices de rendimiento escolar, los que en no pocas ocasiones derivan en deserción o cambio de carrera, a pesar de los esfuerzos que se hacen para invitar que abandonen este tipo de estudios (Rozenzweig *et al.*, 2024).

En la Universidad de Guadalajara la escala de calificaciones es de 0 a 100; de 0 a 59 se considera reprobatoria y de 60 a 100, aprobatoria. En lo que concierne al rezago educativo, suele considerarse a la cantidad de alumnos que no llevan el avance esperado con base en la malla curricular de su plan de estudios.

Otro indicador es el índice de titulación, es decir, la cantidad de egresados que se titulan con relación a los que egresan. Tener la información específica de un programa educativo, en este caso de Ingeniería en Geofísica, permite tener una visión amplia que puede ser de utilidad para la toma de decisiones con relación al programa educativo.

Con base en lo antes descrito, el objetivo de esta investigación es analizar los índices de rendimiento escolar de la licenciatura en Ingeniería en Geofísica del Centro Universitario de los Valles (CUValles) de la Universidad de Guadalajara, como una herramienta para la evaluación de este programa educativo, para contribuir en la toma de decisiones que atiendan las problemáticas que se identifiquen y que permitan decidir el futuro del programa educativo.

Como contexto, esta licenciatura se oferta en dos Centros Universitarios de la Universidad de Guadalajara; se abrió en el CUValles en el ciclo escolar 2017B, es decir, en el segundo semestre del año 2017, y desde el ciclo escolar 2023B no se ha abierto el ingreso de nuevos estudiantes. Con este preámbulo, vemos la importancia de conocer estos indicadores de rendimiento escolar para evaluar desde esta perspectiva el funcionamiento de dicha licenciatura y con ello tener elementos que aporten a la toma de decisiones sobre el futuro de este programa educativo.

De acuerdo con Zoppis (2020), el rendimiento se refiere al uso racional de los recursos, que permite evaluar a un individuo, un proceso o una institución; en lo que corresponde al rendimiento académico lo considera como un indicador de eficiencia, una variable que depende de la eficacia

de los sistemas educativos, también afirma que se puede concentrar en el final de la carrera como en el transcurso de ella.

El rendimiento escolar suele considerarse como una variable que se relaciona con la calidad educativa de las universidades (León *et al.*, 2021), de ahí la importancia del seguimiento de sus indicadores para considerar acciones que incidan en su mejora, partiendo de que el fin de las instituciones de educación superior es lograr la formación de sus estudiantes.

2. Metodología

El análisis se realizó en cada una de las generaciones (cohortes) que ingresaron a Ingeniería en Geofísica del CUValles de la Universidad de Guadalajara, la primera cohorte ingresó en el ciclo escolar 2017B y hasta este momento la última en el ciclo escolar 2023A. También se revisaron los kardex de cada uno de los 150 estudiantes que han ingresado a la Ingeniería en Geofísica desde el ciclo 20017B y hasta la última cohorte en 2023^a; en los dos casos la información se consultó en el Sistema Integral de Información y Administración Universitaria (SIIAU).

En la primera etapa, se consultó la información de las cohortes; con la información obtenida se analizaron los estatus de los estudiantes, es decir, la cantidad de estudiantes activos, egresados, con baja y titulados. Se obtuvieron los valores por cohorte y globales del programa educativo, posteriormente se compararon estos valores entre las diferentes cohortes y se realizó el análisis estadístico de cada uno de ellos.

Posteriormente se obtuvo la información de los 150 estudiantes, con relación a su trayectoria académica, las materias cursadas, las no aprobadas y, en el caso de los estudiantes que desertaron, el máximo semestre en el que permanecieron en la carrera. Esto permitió identificar las materias con reprobación, el semestre de la deserción, el rezago y el estatus de cada uno de ellos. Para el análisis estadístico se utilizó el software Excel de Microsoft.

Con este tipo de análisis se buscó identificar situaciones que permitan planear acciones que generen mejoras que contribuyan al éxito en su formación profesional de los estudiantes, al igual que como lo señalan Sánchez y colaboradores (2021), como para conocer el desempeño de los estudiantes; reunir y generar información institucional, que permita realizar más investigaciones, así como para hacer ajustes en los planes de

estudio y además para destinar recursos que contribuyan para la resolución de las problemáticas identificadas.

3. Resultados

Luego del análisis de la información obtenida sobre las cohortes, en la Tabla 1, se observa que el total de estudiantes que ingresaron al programa educativo fue de 150, teniendo un total de 17 egresados, considerando los tres que ya están titulados.

En esta misma tabla se observa que actualmente hay 27 estudiantes activos, que continúan con sus estudios. Llama la atención que 106 estudiantes han desertado de la carrera, esto es, hay una elevada deserción de 72%.

Tabla 1. Estadística general de cohortes.

Estatus	Cantidad	Porcentaje
Ingreso	150	100
Egresados	17	11.33
Activos	27	18.00
Deserción	106	70.67

Por otra parte, en la Tabla 2, se observan los datos estadísticos completos del estatus de los estudiantes de cada una de las 12 cohortes que ingresaron a Ingeniería en Geofísica.

Tabla 2. Información de estatus de estudiantes por cohorte.

Cohorte	Ingreso de estudiantes	Egresados	Titulados	Deserción	Activos
2017B	11	3	0	8	0
2018A	18	1	3	14	0
2018B	20	4	0	16	0
2019A	15	2	0	12	1
2019B	20	4	0	14	2
2020A	14	0	0	9	5
2020B	16	0	0	11	5
2021A	8	0	0	6	2
2021B	13	0	0	10	3
2022A	3	0	0	2	1
2022B	7	0	0	4	3
2023A	5	0	0	0	5
Total	150	14	3	106	27

Con relación a la deserción por cada cohorte generacional, en la Tabla 3 se muestran los datos correspondientes, así como el semestre en los que se presentaron las deserciones. Se observa que la mayor deserción sucedió en los dos primeros semestres.

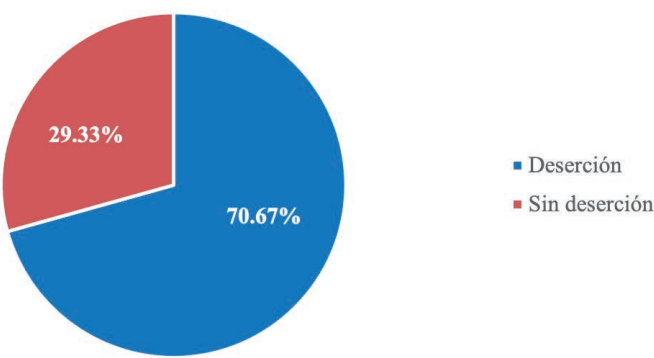
Tabla 3. Deserción por cohorte.

Cohorte	Semestre									Deserción total cohorte
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2017B	5	3	0	0	0	0	0	0	0	8
2018A	8	5	1	0	0	0	0	0	0	14
2018B	4	5	3	2	0	1	1	0	0	16
2019A	6	5	1	0	0	0	0	0	0	12

Cohorte	Semestre									Deserción total cohorte
2019B	7	5	0	1	1	0	0	0	0	14
2020A	4	0	4	0	0	1	0	0	0	9
2020B	4	6	1	0	0	0	0	0	0	11
2021A	5	0	0	1	0	0	0	0	0	6
2021B	7	3	0	0	0	0	0	0	0	10
2022A	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2022B	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4
2023A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total por semestre	56	32	10	4	1	2	1	0	0	106

Por otra parte, la figura muestra que el índice de deserción es superior a 70%; es decir, 106 estudiantes no terminaron su formación en esta carrera, lo cual constituye una situación delicada, ya que considerando que en México, la deserción en las ingenierías suele ser elevada, en este caso el porcentaje de deserción es muy alto.

Figura 1. Deserción.

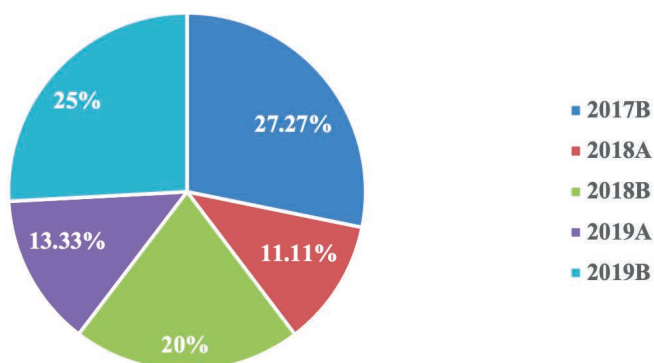


En lo que corresponde a la eficiencia terminal, esto es, la cantidad de estudiantes que egresaron con relación a los que ingresaron, se consideró lo establecido en el Marco de Referencia 2018 para la acreditación de programas de ingeniería del Consejo de Acreditación de Enseñanza de la Ingeniería A. C. (CACEI, 2018) de México. Se considera que la eficiencia terminal deberá ser calculada con base a 1.5 veces la duración del plan de estudios; es decir, la duración del Plan de estudios de Ingeniería en Geofísica es de 9 semestres, por lo que corresponde a 13.5 semestres.

Según lo antes descrito, se decidió contemplar ciclos escolares completos, por lo que se tomó como referencia 14 semestres. Con esta consideración, al momento solamente para la cohorte correspondiente al ciclo 2027B han transcurrido los 14 semestres, por lo que también se optó por considerar todas las cohortes que cuentan con egresados, para realizar en estos casos una estimación preliminar de la eficiencia terminal.

En la Figura 2, se observa la eficiencia terminal de todas las cohortes con egresados, se incluye la cohorte 2017B que, con el criterio señalado previamente, es la única de la que se puede determinar la eficiencia terminal en forma definitiva de las otras solo será un valor preliminar dado que el final se podrá obtener una vez que transcurran para cada una 14 semestres. Como se observa, la eficiencia terminal de la cohorte 2017B es baja y a su vez es la más alta de las cohortes con egresados.

Figura 2. Eficiencia terminal por cohorte.



Por otra parte, en la Tabla 4, se observa la información de los estudiantes que ingresaron, egresaron y que se han titulado de cada cohorte. Al momento, solo se tienen egresados de las primeras cinco cohortes, en total son 17, considerando a los tres que ya se han titulado.

Tabla 4. Egresados y titulados.

Cohorte	Ingreso de estudiantes	Egresados	Titulados
2017B	11	3	0
2018A	18	1	3
2018B	20	4	0
2019A	15	2	0
2019B	20	4	0

En lo que corresponde a la reprobación, el análisis se hizo por cada cohorte generacional; se identificaron las materias con mayor porcentaje de reprobación. La información se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Materias con mayor reprobación.

Cohorte	Materia	Semestre	Porcentaje reprobación
2017B	Física Newtoniana	1	42.85
	Métodos Matemáticos I	1	42.85
	Seminario de Métodos Matemáticos I	1	42.85
	Métodos Matemáticos II	2	100
	Seminario de Métodos Matemáticos II	2	75
	Física Estadística	4	22.22

Cohorte	Materia	Semestre	Porcentaje reprobación
2018A	Física Newtoniana	1	73.33
	Métodos Matemáticos I	1	50
	Métodos Matemáticos II	2	19.04
2018B	Física Newtoniana	1	60
	Métodos Matemáticos I	1	31.57
	Métodos Matemáticos II	2	65.21
	Física Estadística	2	22.22
2019A	Física Newtoniana	1	70.58
	Métodos Matemáticos I	1	58.33
	Métodos Matemáticos II	2	56.52
	Seminario de Métodos Matemáticos II	2	33.33
2019B	Física Newtoniana	1	60
	Métodos Matemáticos I	1	16.66
2020A	Seminario de Métodos Matemáticos I	1	33.33
	Métodos Matemáticos II	2	25
2020B	Métodos Matemáticos I	1	25
	Métodos Matemáticos II	2	30
2021A	Métodos Matemáticos I	1	75
	Seminario de Métodos Matemáticos I	1	55.55
	Física Newtoniana	1	50
	Métodos Matemáticos II	2	25
	Seminario de Métodos Matemáticos II	2	20
	Métodos Matemáticos III	3	33.33
2021B	Métodos Matemáticos I	1	28.57
	Seminario de Métodos Matemáticos I	1	33.33
	Métodos Matemáticos II	2	66.66

Cohorte	Materia	Semestre	Porcentaje reprobación
2022A	Geología Física	1	100
2022B	Seminario de Programación	2	100

Se observa que las materias que en la mayoría de las cohortes presentan alta reprobación son las materias del área de las Matemáticas. Por otra parte, sobresalen tres materias que tuvieron una reprobación de la totalidad de los estudiantes. Otra cuestión que sobresalió durante el análisis, es que la reprobación se incrementa aún más cuando estas materias son asignadas a algunos profesores en particular.

Vale la pena señalar que con base en la información analizada de la trayectoria académica de los estudiantes, en esta carrera no se identifica rezago, es decir los estudiantes avanzan en su trayectoria académica según en los tiempos establecidos para concluir la totalidad de créditos de su carrera.

Conclusiones

El estudio realizado permitió conocer con detalle la situación de los índices de rendimiento escolar de Ingeniería en Geofísica del CUValles. En el análisis se identificó que la cantidad de estudiantes que ingresaron a la Ingeniería en Geofísica es baja comparada con otros programas educativos; sin embargo, para este tipo de ingenierías está dentro de los valores normales.

Lo que sí cabe resaltar, preocupar y darle atención es el elevado porcentaje de deserción. Llama la atención que en los dos primeros semestres se presenta la mayor deserción en todas las cohortes y también en estos semestres, es en los que se presentan las materias con mayor porcentaje de reprobación, por lo que no se descarta que este sea uno de los factores que influyen en la deserción. Esta situación suele presentarse también en otras ingenierías del CUValles y de otras instituciones, por lo que sería importante un análisis integral de esta problemática.

Por otra parte, se identificó que la eficiencia terminal es baja, en el mejor de los casos, la cohorte 2017B tiene una eficiencia terminal del 27.27%, estando pendiente de determinar la eficiencia terminal final de

las cohortes en las que aún no transcurre el tiempo requerido para su cálculo.

En este sentido con relación al egreso, al momento se tienen 17 egresados, de los cuales tres de ellos ya están titulados. En los tres casos, la titulación fue mediante tesis, lo cual vale la pena destacar dado que por esta modalidad en todos los programas educativos se tiene un bajo número de egresados.

Con relación al rezago, este no se presenta en el programa educativo, los estudiantes avanzan en su trayectoria académica según lo establecido en el dictamen del plan de estudios.

Los resultados obtenidos permiten conocer la situación de este programa educativo, lo cual es de utilidad para tomar decisiones que permitan atender la problemática que se identificó, buscando impactar su mejora, su desarrollo y la formación de los estudiantes, así como la toma de decisiones sobre esta carrera. Por otra parte, este estudio podría replicarse en los demás programas educativos del CUValles, en particular en las ingenierías, con el fin identificar la situación de estos indicadores y de esta manera plantear estrategias integrales que contribuyan a la mejora continua y que brinden condiciones que permitan para una mejor formación de los estudiantes.

Referencias

- Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería A. C. (2018). Marco de Referencia 2018 para la acreditación de programas de Ingeniería. https://cacei.org.mx/nv/nvdocs/marco_ing_2018.pdf
- Castro, C., Gómez, A., Fantin, R. & Gutiérrez, N. (2023). Terminal Efficiency, Lag and Dropout in Cohorts from 2007 to 2014 of Dental Students at the University of Costa Rica. *Odovtos International Journal of Dental Sciences*, 25(3), 130-161. <https://dx.doi.org/10.15517/ijds.2023.55636>
- Francis, B., Babu, S. (2019). Predicting Academic Performance of Students Using a Hybrid Data Mining Approach. *J Med Syst* 43, 162. <https://doi.org/10.1007/s10916-019-1295-4>
- León, X., Q., Mendoza, M. & Gilar, R. (2021). Clima de aula y rendimiento académico: apuntes en torno al contexto universitario. *Revista Venezolana de Gerencia*, 26(5), 140-156.
- Liu, X., Ji, X. & Zhang, Y. (2023). Trajectories of College Students" General Self-efficacy, the Related Predictors, and Depression: A Piecewise Growth Mixture Modeling Approach. *Heliyon*, 9, 5, e15750. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15750>.
- Miranda, H., Miranda, E., Lara, L. & Saracostti, M. (2021). Análisis longitudinal del rendimiento escolar según el compromiso escolar y factores contextuales: El caso chileno. *Revista Iberoamericana de Diagnóstico y Evaluación-e Avaliação Psicológica*, 2(59), 163-175.
- Núñez, A. (2020). Deserción y retención: retos en la educación superior. *Revista Científica Retos de La Ciencia*, 4(9), 15-23. <https://retosdelacienciaec.com/Revistas/index.php/retos/article/view/320>
- Pérez, B. (2017). Análisis de trayectorias escolares de estudiantes de la licenciatura en geografía de la UAEMEX. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 7(14), 345-371. <https://doi.org/10.23913/ride.v7i14.291>
- Rico, A. & Gaytán, N. (2022). Modelos predictivos del rendimiento académico a partir de características de estudiantes de ingeniería. *IE Revista de Investigación Educativa de la REDIECH*, 13, e1426. https://doi.org/10.33010/ie_rie_rediech.v13i0.1426

- Rodríguez, I., Pérez, R. & Flores, J. (2021). Estrategias para mejorar la calidad educativa con base en el análisis de la trayectoria académica en el área de ingeniería. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 11(22).
- Rosenzweig, E., Chen, X., Song, Y., Baldwin, M., Barger, M., Cotterell, M., Dees, J., Injaian, A., Weliweriya, N., Walker, J., Wiegert, C. & Lemons, P. (2024). Beyond STEM Attrition: Changing Career Plans within STEM Fields in College is Associated with Lower Motivation, Certainty, and Satisfaction about one's Career. *International Journal of STEM Education* 11, 15. <https://doi.org/10.1186/s40594-024-00475-6>
- Sperling, J., Mburi, M., Gray, M., Schmid, L. & Saterbak, A. (2024). Effects of a First-year Undergraduate Engineering Design Course: Survey Study of Implications for Student Self-efficacy and Professional Skills, with Focus on Gender/sex and Race/ethnicity. *International Journal of STEM Education*, 11, 8. <https://doi.org/10.1186/s40594-024-00467-6>
- Secretaría de Educación Pública de México. (2019). Lineamientos para la formulación de indicadores educativos. https://www.planeacion.sep.gob.mx/Doc/estadistica_e_indicadores/lineamientos_formulacion_de_indicadores.pdf
- Tayebi, A., Gómez, J. & Delgado, C. (2021). Analysis on the Lack of Motivation and Dropout in Engineering Students in Spain. *IEEE Access*, 9, 66253-66265.
- Tormon, R., Lindsay, B., Paul, R., Boyce, M. & Johnston, K. (2023). Predicting Academic Performance in First-Year Engineering Students: the Role of Stress, Resiliency, Student Engagement, and Growth Mindset. *Learning and Individual Differences*, 108, 102383.
- Zoppis, D. (2020). Rezago universitario: discusión teórica, metodológica y su manifestación en la carrera de Arquitectura de la Universidad de la República. Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ciencias Sociales.

4. Aplicaciones de hidrogeles a base de quitosano para la curación de heridas: una breve revisión

Rogelio Rodriguez Rodriguez¹

Ailen Guadalupe Becerra Avila¹

Resumen

Los hidrogeles poliméricos se caracterizan por su capacidad de cargar eficientemente moléculas bioactivas, así como por su porosidad, propiedades mecánicas similares a los tejidos blandos, alta capacidad de absorción de agua y biocompatibilidad, lo que los hace adecuados como apósitos en la curación de heridas. El quitosano es uno de los polímeros más utilizados en la fabricación de hidrogeles, tanto por su facilidad de fabricación como por sus propiedades intrínsecas, ideales para el proceso de curación de heridas. En este trabajo de revisión se describen los conceptos más importantes sobre los hidrogeles, así como el uso del quitosano en la formación de los mismos, resaltando algunos de los trabajos de investigación que demuestran su efectividad como apósito en la duración de heridas.

Palabras clave: hidrogeles, quitosano, cicatrización de heridas, aplicaciones de hidrogeles.

1 Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, Carretera Guadalajara-Ameca km. 45.5, C.P. 46600, Ameca, Jalisco, México.

1. Introducción

En los problemas relacionados con heridas destaca el proceso de cicatrización de una herida normal, ya que este tiene un tiempo de entre 2 a 4 semanas, con distintas fases, para finalmente obtener un tejido cicatricial. Para la curación de heridas hay diferentes tratamientos tradicionales, como lo son gasas y algodón, materiales poco higiénicos que no ayudan a la pronta recuperación de la herida. Pero, con los avances científicos se ha logrado obtener mayor conocimiento sobre el manejo y proceso de la cicatrización de heridas, así como el desarrollo de distintas herramientas que se han implementado en la mejora del proceso de cicatrización.

En este caso se tienen los hidrogeles, los cuales se consideran como tratamiento moderno, ya que sus estructuras, como redes poliméricas hidrofílicas, tienen una gran capacidad de absorción de agua y fluidos biológicos. De esta manera, los hidrogeles se han convertido en uno de los biomateriales más eficientes en las aplicaciones biomédicas actuales, ya que sus propiedades, como flexibilidad, versatilidad, estructura y biocompatibilidad, los hacen convenientes para ayudar al proceso de cicatrización de heridas, debido a su estructura porosa que puede simular al tejido vivo.

Otra ventaja, es que la estructura química y forma de los hidrogeles son de fácil modificación, por ejemplo, usualmente son producidos por polímeros naturales o sintéticos como el quitosano. Así, en este trabajo de investigación nos adentramos a llevar a cabo una revisión descriptiva de investigaciones sobre los hidrogeles de base de quitosano y sus aplicaciones como apósito en el proceso de curación de las heridas, tomando en cuenta sus principales propiedades y efectos en la cicatrización.

2. Material y/o metodología

Este trabajo se propone una revisión descriptiva con el fin de indagar en aquellas investigaciones que cumplan con los criterios que se han seleccionado, estos son:

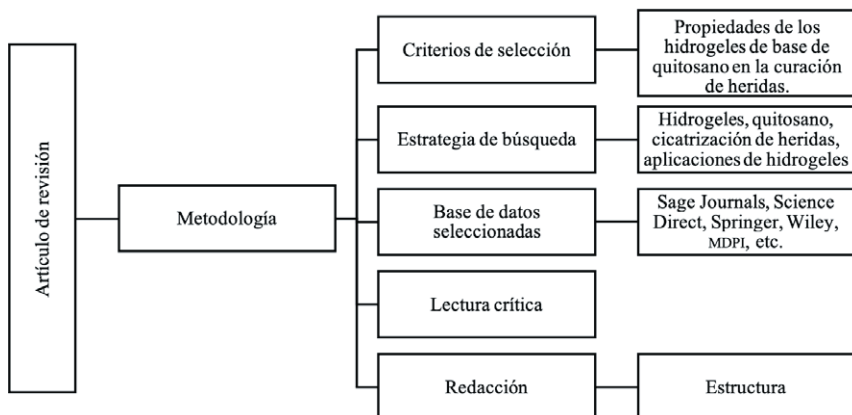
- a. Investigaciones que mencionen la efectividad de los hidrogeles a base de quitosano en la regeneración epitelial, al igual su acción contra agentes infecciosos.

- b. Investigaciones que mencionen las propiedades mecánicas, físico-químicas y biológicas de los hidrogeles a base de quitosano.
- c. Investigaciones que mencionen la efectividad del uso del quitosano en beneficio del proceso de cicatrización de heridas.

Una vez definidos los criterios de investigación, sigue mencionar aquellas bases de datos utilizadas para la búsqueda de información, siendo estas: Sage Journal, Science Direct, Springer, Wiley, MDPI, Taylor & Francis, etcétera, de modo que formulamos la pregunta de investigación: ¿Cómo las aplicaciones de los hidrogeles de base de quitosano mejoran o aceleran el proceso de cicatrización de las heridas?

En este trabajo, se propone la siguiente metodología (Figura 1).

Figura 1. Metodología para la elaboración de revisión en la literatura.



3. Resultados de la búsqueda en la literatura

3.1. La cicatrización de heridas

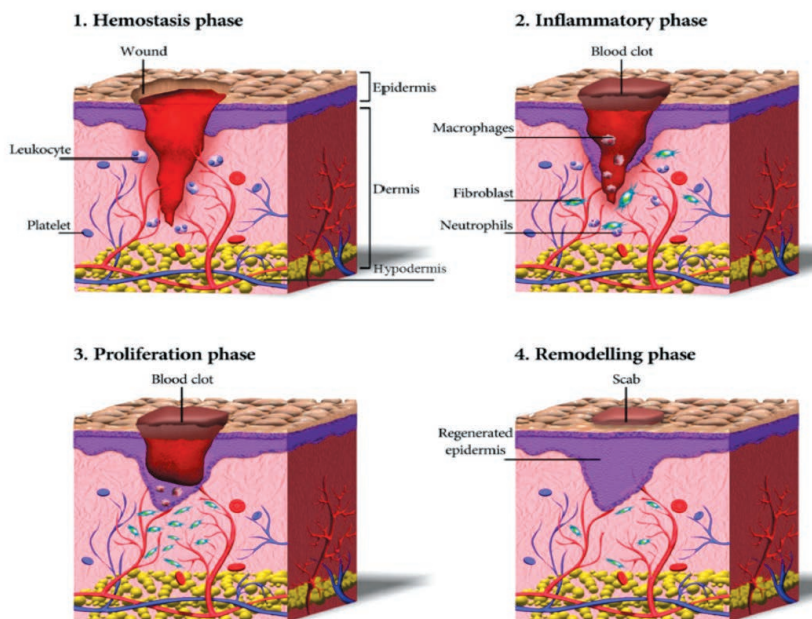
La piel es el órgano más grande que tiene el ser humano, actúa como una barrera para protegerse de diversos factores ambientales. En el momento en que la piel es dañada, esta comienza el proceso de cicatrización, se activan los diferentes mecanismos, los cuales se dividen en cuatro fases: a) hemostasia, b) inflamación, c) proliferación, y d) remodelación. Por otra

parte, las heridas se pueden clasificar dependiendo de su grado de lesión, el tiempo que tarda en cicatrizar, entre otros. En este sentido, las heridas agudas son aquellas que su proceso de cicatrización es normal y no conlleva a ningún retraso en su proceso, con un aproximado de 5 a 30 días en cicatrizar, mientras que las heridas crónicas se determinan como aquellas que su proceso de cicatrización no es continuo, siendo incompleto o perturbado en distintas fases del proceso de cicatrización (Abazari *et al.*, 2022).

3.2. Proceso de cicatrización de heridas

El proceso de cicatrización y/o reparación de heridas es un proceso continuo y complejo, que se divide en diversas partes, el cual consta de cuatro fases: a) hemostasia, b) inflamación, c) proliferación, y d) remodelación (Figura 2) (Elangwe *et al.*, 2022).

Figura 2. Fases del proceso de cicatrización de heridas.
Tomado de Elangwe *et al.*, 2022.



3.2.1. Hemostasis

El propósito de esta fase es detener la hemorragia, ya que aquí se activan los sistemas de coagulación sanguínea, donde las interacciones de los componentes de la sangre y la constricción vascular, al igual que la activación de las plaquetas, forman el coágulo, el cual es una matriz temporal que proporciona soporte al igual que inicia la migración celular, lo que permite la formación del coágulo y el inicio de la reparación del tejido.

3.2.2. Inflamación

En este momento se activan los mecanismos de defensa donde distintas células sanguíneas eliminan bacterias y otros residuos. Esta fase se divide en inflamatoria temprana e inflamatoria tardía.

3.2.3. Proliferación

Aquí se construye una barrera que protege de interior a exterior por medio de la contracción y reepitelización, en la cual se tiene acumulación de colágeno, y el tejido de granulación comienza a cicatrizar por lo que las células epiteliales comienzan a formar la matriz extracelular.

3.2.4. Remodelación

Finalmente, en la fase de remodelación se lleva a cabo la formación de un nuevo epitelio y el tejido cicatricial, se menciona que esta fase se inicia en conjunto con la fase proliferativa, donde se obtiene la cicatriz madura por lo que su resistencia original será del 80%.

3.3. Factores que afecta la cicatrización de heridas

Con respecto a cuáles son los factores que intervienen en el proceso de cicatrización de las heridas causando afectaciones, se encuentran diversos factores, pero en general se pueden clasificar en locales y sistémicos; en la Tabla 1 se muestran estas afectaciones (Guo & DiPietro, 2010).

Tabla 1. Factores locales y sistémicos que afectan el proceso de curación de las heridas.

	Factor	Descripción
Factores locales	Oxigenación	Induce la angiogénesis y la contracción vascular.
	Infección	Determina una herida contaminada.
	Isquemia	Puede inducir a la necrosis y la apoptosis celular.
	Edema	Reduce el suministro de sangre arterial.
Factores sistémicos	Edad	Afecta la respuesta inflamatoria y la fase de remodelación.
	Estrés	Promueve la hipoxia de la herida.
	Enfermedades	Causan distintas afecciones dañando la salud.
	Medicación	Afecta la respuesta inflamatoria, retrasando el proceso de curación.

3.4. Tratamientos convencionales

Para el proceso de cicatrización de las heridas se mencionan diversas terapias tradicionales que aún se utilizan o se han modificado para así tener una mayor eficacia en el proceso de cicatrización. Estos tratamientos se utilizan como técnicas alternativas en distintas clínicas, ya sea por su fácil accesibilidad o por su bajo costo (Aramwit, 2016). Estos tratamientos se clasifican dependiendo de sus compuestos derivados de hierbas y productos de origen animal, ejemplo de estos son cremas/ ungüentos, organismos vivos, entre otros. En la Tabla 2 se describen sus ventajas y desventajas que tienen este tipo de tratamientos.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los tratamientos convencionales.

Ventajas	Desventajas
• Se tiene mayor facilidad al removerlo. • Mayor facilidad al momento de la aplicación. • Bajos costos. • Mayor accesibilidad. • Mayor capacidad de biocompatibilidad.	• No son útiles en heridas crónicas. • Poco tiempo de utilización • El proceso de cicatrización de heridas tarda más en avanzar. • Poca capacidad de esterilidad.

3.5. Tratamientos modernos

Como ya se mencionó, hay avances en la fabricación de distintos biomateriales y técnicas que se pueden aplicar al proceso de curación de las heridas. Por ejemplo, los hidrocoloides e hidrogeles, los cuales son materiales hidrofílicos que absorben fluidos y mantienen húmeda a la herida. Los apósitos de alginato logran absorber fluidos pero no mantienen la humedad, al igual los sustitutos de la piel como los xenoinjertos; la terapia de presión negativa que logra mantener el flujo sanguíneo y promover la cicatrización de las heridas; y, finalmente los hidrogeles que mantienen un entorno húmedo y limpio para el proceso de cicatrización de las heridas, por lo que ha ayudado a comprender mejor las metodologías, técnicas de caracterización y diversos ensayos de prueba con los cuales se han observado todos aquellos mecanismos de estos procesos y en cómo actúan (Brumberg et al., 2021).

3.6. Apósitos poliméricos

La formación de los polímeros comienza por la unión de monómeros, por lo que sus uniones forman macromoléculas. Se menciona que los polímeros naturales son los más usados en las investigaciones actuales dentro del proceso de curación de heridas ya que diversos polímeros cuentan con excelentes propiedades de biocompatibilidad y de biodegradabilidad, además ayudan con la regeneración de tejido.

Los polímeros naturales se pueden modificar y agregarles algún componente sintético para mejorar diversas propiedades tanto físicas,

mecánicas o biológicas, dependiendo de su fin. Para este caso, los hidrogeles tienen relevancia por estar formados de distintos componentes, ya que por sus redes poliméricas tridimensionales tienen la capacidad de absorber agua o en algunos casos fluidos biológicos. Se menciona que al llevar un procesamiento por radiación se obtienen nuevos biomateriales que se basan en polímeros naturales renovables, no tóxicos y biodegradables (Mogoşanu & Grumezescu, 2014).

3.7. Hidrogeles

3.7.1. Definición

Los hidrogeles se pueden definir como una estructura polimérica porosa tridimensional en forma de red, por lo que sus propiedades dependen de la presencia de grupos funcionales hidrófilos, alta capacidad termodinámica y su alta capacidad de absorción de agua, y su gran similitud a los tejidos. Para que se pueda considerar como un hidrogel, este tiene que absorber más del 10% de agua (Khansari *et al.*, 2017).

3.8. Clasificación

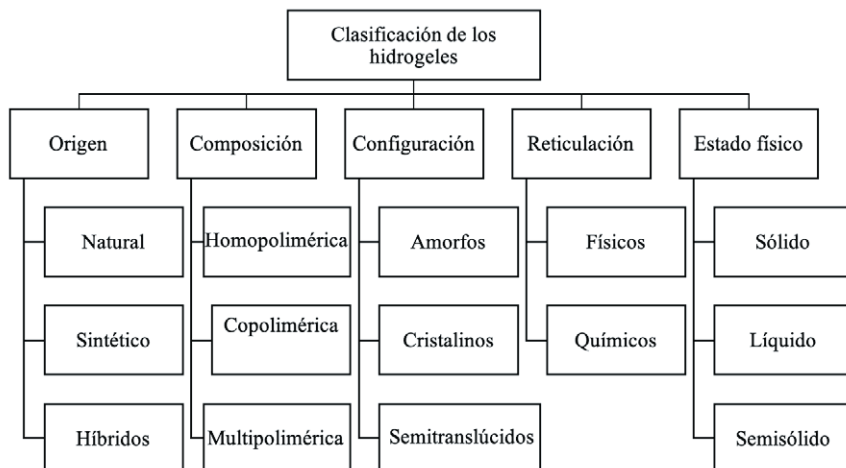
Los hidrogeles se pueden clasificar según los criterios que se tomen en cuenta, como, por ejemplo, el origen, su carga iónica, su capacidad de respuesta, y el tipo de entrecruzamiento, por lo que a continuación se mencionan dichas características en su respectiva clasificación (Figura 3) (Singhal & Gupta, 2016).

3.9. Quitosano

3.9.1. Obtención del quitosano

El quitosano es considerado el único polisacárido con carga positiva, ya que este se obtiene de la desacetilación de la quitina, la cual se encuentra en distintos organismos, mayormente marinos. Una vez desacetilado, los grupos amino presente en la estructura polimérica son disponibles. El quitosano posee diversas propiedades como la citocompatibilidad, biocompatibilidad, solubilidad en condiciones ácidas, actividad antibacteriana y sus propiedades reológicas, las cual dependen de su peso

Figura 3. Clasificación de los hidrogeles.



molecular y grado de desacetilación. Además, el quitosano tiene la capacidad de absorber contaminantes y metales pesados (Ye *et al.*, 2023).

3.9.2. Beneficios de los hidrogeles de quitosano en el área de la salud

Los hidrogeles se pueden aplicar en distintas áreas. En el caso del quitosano, al ser utilizado en el área de la salud tiene diversos beneficios por sus amplias propiedades o características, como los que se mencionan a continuación. El quitosano al contar con la propiedad de mucoadhesión, se formulan andamios de hidrogel los cuales tiene como finalidad aliviar enfermedades bucales, al igual que la administración de fármacos en el estómago e intestino, al igual que en el colon, que ayudará en contrarrestar la irritabilidad o enfermedades inflamatorias intestinales. En la administración de hidrogeles oculares para la liberación de fármacos la retención del fármaco aumenta, y de esta forma se tiene una mayor biodisponibilidad (Shariatinia & Jalali, 2018).

3.10. Propiedades de los hidrogeles como apósitos en la curación de heridas

Las propiedades fisicoquímicas, mecánicas o biológicas son primordiales en este hidrogel, para que este sea efectivo a la hora de ser aplicado a la herida. Algunas de las de las propiedades que deben de cumplir dichos hidrogeles es no presentar componentes tóxicos, tener una alta capacidad de prevención de las infecciones bacterianas, capacidad adhesiva a la herida su nivel de humedad debe de ser óptima para promover la migración y proliferación de células, debe ser termodinámico y permeable para facilitar el paso del oxígeno.

3.11. Investigaciones sobre hidrogeles en la curación de heridas y sus propiedades

En la Tabla 3 se muestran investigaciones que se han realizado sobre hidrogeles a base de quitosano, describiendo sus características y propiedades, y mostrando su utilidad en el proceso de cicatrización de heridas.

Tabla 3. Estado del arte sobre hidrogeles de base de quitosano para la curación de heridas.

Autor y año	Polímero	Método de cruzamiento	Molécula bioactiva	Propiedades mecánicas	Propiedades fisicoquímicas	Propiedades biológicas
(Yang et al., 2023)	Quitosano.	CCO	Lisina y DOPA.	Alta adhesión, viscoelasticidad.	No menciona.	Efecto inhibidor en bacterias, eliminación de radicales.
(Lin et al., 2023)	Quitosano.	No especificado.	Ácido hialurónico.	Alta estabilidad.	Estructura porosa reducida.	Medio efecto i nhibidor de bacterias.

(Liu et al., 2024)	Quitosano carboximetilado y dextra-oxidado.	Enlaces cruzados de base Schiff.	Proantocianidinas y antocianidinas.	Alta estabilidad, alta adhesión.	Estructura homogénea y porosa.	Efecto inhibidor en bacterias, alta biocompatibilidad.
(M. Zhang et al., 2023)	Quitosano modificado con pirogalol y alcohol polivinílico.	No especificado.	iones de zinc, clorhidrato de etil-lauroil-arginato.	Alta absorción de agua, alta adhesión, alta estabilidad.	Estructura porosa reducida.	Efecto inhibidor de bacterias, alta biocompatibilidad.
(Tatarusanu et al., 2023)	Quitosano.	Enlaces cruzados de base de Schiff.	Quitosano oxidado, ácido hialurónico.	Alta viscoelasticidad, alta estabilidad.	No menciona.	Alta biocompatibilidad, efecto inhibidor en bacterias.
(Witkowska et al., 2023)	Quitosano y ácido hialurónico.	DOE	<i>Centella asiatica</i> (asiatic oside).	Alta viscoelasticidad, alta adhesión.	Estructura porosa .	Alta biocompatibilidad, efecto inhibidor en bacterias.
(Şalva et al., 2023)	Quitosano/ácido hialurónico.	MMW	Miel.	Poca viscoelasticidad, poca hinchazón.	Estructura porosa irregular homogénea.	Alta biocompatibilidad, alto efecto inhibidor.
(Masood et al., 2022)	Quitosano/sulfato de condroitina.	Método de gelificación por congelación.	Jugo de ajo (Gar).	Alta hinchazón, buena estabilidad.	Estructura porosa estable.	Efecto inhibidor en bacterias.
(Hashemi et al., 2022)	Quitosano/ácido acético.	Gel	Raíz de <i>Berberis integerrima</i> .	Poca viscoelasticidad.	No menciona.	Efecto inhibidor en bacterias, alta biocompatibilidad.

(Deng et al., 2022)	Quitosano cauterizado.	Base de Schiff.	Celulosa bacteriana de dialdehído.	Alta viscoelasticidad, alta hinchazón.	Estructura porosa uniforme.	Alta capacidad biodegradable, efecto inhibidor en bacterias, alta biocompatibilidad.
(L. Zhang et al., 2023)	Quitosano / L-arginina.	Cruzamiento por enlaces a base de Schiff.	Aldehído de <i>Phellinus igniarius</i> .	Alta absorción, alta estabilidad.	Estructura porosa.	Efecto inhibidor en bacterias, alta biocompatibilidad.
(Narayana et al., 2023)	Quitosano.	Cruzamiento por goma guar como agente gelificante.	Fibrina de seda.	Alta viscoelasticidad, alta absorción.	Alta estabilidad, estructura porosa lisa homogénea.	Efecto inhibidor en bacterias, alta biocompatibilidad.

3.12. Aplicaciones de los hidrogeles de quitosano en la curación de heridas

De acuerdo con la Tabla 3, vemos cómo distintos investigadores han realizado estudios experimentales donde han logrado aplicar al proceso de curación de las heridas, obteniendo un hidrogel con propiedades biológicas, fisicoquímicas y mecánicas que es efectivo para el proceso de cicatrización.

Una investigación es la de Zanchetta y colaboradores (2024), quienes formularon un hidrogel cuyo objetivo es proporcionar propiedades en la curación de heridas compuesto por insulina, quitosano e hidroxipropilmetilcelulosa, el cual se caracterizó por analizar ftir, estabilidad térmica y de punto de gelación. Además, se evaluaron propiedades *in vitro* usando queratinocitos humanos (HaCat) por mtt y ensayo de rascado de heridas, donde se sembraron células HaCat en una placa con 12 pocillos que, al obtener una monocapa celular, se rasgó en línea recta, por lo que se sustituyó por un cultivo el cual contenía el hidrogel compuesto.

En el estudio de mtt, los resultados mostraron que luego de 72 horas se obtuvo un aumento de viabilidad celular de los queratinocitos; respecto al ensayo de rascado, luego de 60 horas se observó que la zona

se encontraba totalmente cerrada en comparación del grupo de control e hidrogeles, obteniendo efectos de cicatrización rápidos. También se llevó a cabo la prueba de manera *in vivo* en ratones diabéticos, evaluando la promoción de la cicatrización de las heridas. Al paso del día 3 se mostró que el hidrogel obtuvo una mayor retracción en la herida, por lo que al día 20 se encontraba totalmente cerrada la herida, por lo que se concluyó en una mayor reparación del tejido, reconociendo al hidrogel como un nuevo tratamiento para la cicatrización de heridas.

La formación de hidrogeles cargados con productos naturales es un área poco explorada por las dificultades de extracción de estos productos. Şalva y colaboradores (2023) presentaron un hidrogel coacervado de quitosano/ácido hialurónico/miel sin la agregación de productos químicos: Los hidrogeles se caracterizaron por FTIR, SEM y análisis reológicos, se llevó a cabo en un estudio *in vivo* en ratas que se dividieron en tres grupos: el de control, el grupo quitosano/ácido hialurónico y el grupo quitosano/ácido hialurónico/miel. El resultado como el hidrogel con miel aceleró la cicatrización de la herida al día 7 en conjunto con la reepitelización y la formación del tejido de granulación aumento en comparación a los otros grupos. Así se demostró que, al agregar la miel al quitosano y ácido hialurónico, se alarga el tiempo de efecto en la herida, obteniendo una cicatrización total, aplicándose como un potencial tratamiento.

4. Conclusiones

La cicatrización de las heridas es compleja, de ahí la importancia de tomar en cuenta aquellas herramientas que mejoran este proceso y nos ayudan a comprender mejor sus funciones. La utilización de los hidrogeles es una de las herramientas más viables por su bajo costo y accesibilidad, por lo que, en conjunto de diversos componentes naturales o sintéticos, los hacen adecuados para ser aplicados en el proceso de cicatrización.

Finalmente, se eligió al quitosano por su la facilidad de ser modificado y mezclado con otros componentes, como a lo largo del artículo se han mostrado apoyados en diversas investigaciones. Los hidrogeles y el quitosano son excelentes para ser aplicados al proceso de cicatrización de las heridas, así pues se pueden diseñar diversos hidrogeles con nuevas tecnologías para obtener aún mejores resultados en el proceso de cicatrización.

Referencias

- Abazari, M., Ghaffari, A., Rashidzadeh, H., Badeleh, S. M. & Maleki, Y. (2020). A Systematic Review on Classification, Identification, and Healing Process of Burn Wound Healing. *The International Journal of Lower Extremity Wounds*, 21(1), 18-30. <https://doi.org/10.1177/1534734620924857>
- Aramwit, P. (2016). Introduction to biomaterials for wound healing. En *Elsevier eBooks* (pp. 3-38). <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-456-7.00001-5>
- Brumberg, V., Astrelina, T., Malivanova, T. & Samoilov, A. (2021). Modern Wound Dressings: Hydrogel Dressings. *Biomedicines*, 9(9), 1235. <https://doi.org/10.3390/biomedicines9091235>
- Deng, L., Wang, B., Li, W., Han, Z., Chen, S. & Wang, H. (2022). Bacterial Cellulose Reinforced Chitosan-based Hydrogel with Highly Efficient Self-healing and Enhanced Antibacterial Activity for Wound Healing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 217, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.017>
- Elangwe, C. N., Morozkina, S. N., Olekhovich, R. O., Krasichkov, A., Polyakova, V. O. & Uspenskaya, M. V. (2022). A Review on Chitosan and Cellulose Hydrogels for Wound Dressings. *Polymers*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/polym14235163>
- Guo, S. & DiPietro, L. A. (2010). Factors Affecting Wound Healing. *Journal of Dental Research*, 89(3), 219-229. <https://doi.org/10.1177/0022034509359125>
- Hashemi, M., Kalalinia, F., Razi, M., Moameri, F., Bazzaz, B. S. F., Iranshahi, M. & Movaffagh, J. (2022). Evaluation of the Efficiency of Chitosan Hydrogel Containing Berberis Integerima Root Extract on a Full-thickness Skin Wound in a Rat Model. *Macromolecular Research*, 30(8), 527-35. <https://doi.org/10.1007/s13233-022-0043-7>
- Khansari, M. M., Sorokina, L. V., Mukherjee, P., Mukhtar, F., Shirdar, M. R., Shahidi, M. & Shokuhfar, T. (2017). Classification of Hydrogels Based on their Source: A Review and Application in Stem Cell Regulation. *JOM (Warrendale, Pa.: 1989)*, 69(8), 1340-1347. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2412-9>
- Lin, Y., Xu, J., Dong, Y., Wang, Y., Yu, C., Li, Y., Zhang, C., Chen, Q., Chen, S. & Peng, Q. (2023). Drug-free and Non-crosslinked Chitosan/hyaluronic Acid Hybrid Hydrogel for Synergistic Healing of Infected Diabetic Wounds.

- Carbohydrate Polymers*, 314(120962), 120962. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120962>
- Liu, K., Yu, Y., Zhao, H., Yang, M., Zhang, C., Guan, F. & Yao, M. (2024). Cowberry Extract Loaded Chitosan Hydrogel with Photothermal and Antioxidant Properties Promotes Infected Wound Healing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 262(129988), 129988. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129988>
- Masood, F., Makhdoom, M. A., Channa, I. A., Gilani, S. J., Khan, A., Hussain, R., Batool, S. A., Konain, K., Rahman, S. U., Wadood, A., bin Jumrah, M. N. & Rehman, M. A. U. (2022). Development and Characterization of Chitosan and Chondroitin Sulfate Based Hydrogels Enriched with Garlic Extract for Potential Wound Healing/skin Regeneration Applications. *Gels (Basel, Switzerland)*, 8(10), 676. <https://doi.org/10.3390/gels8100676>
- Mogoșanu, G. D. & Grumezescu, A. M. (2014). Natural and Synthetic Polymers for Wounds and Burns Dressing. *International Journal of Pharmaceutics*, 463(2), 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2013.12.015>
- Narayana, S., Nasrine, A., Ahmed, M. G., Sultana, R., Gowda, B. J., Surya, S., Almuqbil, M., Asdaq, S. M. B., Alshehri, S. & Hussain, S. (2023). Potential Benefits of Using Chitosan and Silk Fibroin Topical Hydrogel for Managing Wound Healing and Coagulation. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 31(3), 462-471. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2023.01.013>
- Şalva, E., Akdağ, A. E., Alan, S., Arisoy, S. & Akbuğa, F. J. (2023). Evaluation of the Effect of Honey-containing Chitosan/hyaluronic Acid Hydrogels on Wound Healing. *Gels (Basel, Switzerland)*, 9(11), 856. <https://doi.org/10.3390/gels9110856>
- Shariatnia, Z. & Jalali, A. M. (2018). Chitosan-based Hydrogels: Preparation, Properties and Applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 115, 194-220. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.034>
- Singhal, R. & Gupta, K. (2016). A Review: Tailor-made Hydrogel Structures (Classifications and Synthesis Parameters). *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(1), 54-70. <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1050520>
- Tatarusanu, S. M., Sava, A., Profire, B.S., Pinteala, T., Jitareanu, A., Iacob, A. T., Lupascu, F., Simionescu, N., Rosca, I. & Profire, L. (2023). New Smart Bioactive and Biomimetic Chitosan-based Hydrogels for Wounds Care

- MJanagement. *Pharmaceutics*, 15(3), 975. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030975>
- Witkowska, K., Paczkowska-Walendowska, M., Plech, T., Szymanowska, D., Michniak-Kohn, B. & Cielecka-Piontek, J. (2023). Chitosan-basedH for Controlled Delivery of Asiaticoside-rich Centella Asiatica Extracts with Wound Healing Potential. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(24), 17229. <https://doi.org/10.3390/ijms242417229>
- Yang, Y., Ma, Y., Wang, J., You, L., Zhang, R., Meng, Q., Zhong, S., He, W. & Cui, X. (2023). Chitosan-based Mussel-inspired Hydrogel for Rapid Self-healing and High Adhesion of Tissue Adhesion and Wound Dressings. *Carbohydrate Polymers*, 316(121083), 121083. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121083>
- Ye, R., Liu, S., Zhu, W., Li, Y., Huang, L., Zhang, G. & Zhang, Y. (2023). Synthesis, Characterization, Properties, and Biomedical Application of Chitosan-based Hydrogels. En *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202305.0300.v1>
- Zanchetta, F. C., De Wever, P., Morari, J., Gaspar, R. C., Prado, T. P. do, De Maeseneer, T., Cardinaels, R., Araújo, E. P., Lima, M. H. M. & Fardim, P. (2024). In Vitro and in Vivo Evaluation of Chitosan/hpmc/insulin Hydrogel for Wound Healing Applications. *Bioengineering (Basel, Switzerland)*, 11(2), 168. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11020168>
- Zhang, L., Yang, J., Liu, W., Ding, Q., Sun, S., Zhang, S., Wang, N., Wang, Y., Xi, S., Liu, C. Y., Ding, C. & Li, C. (2023). A Phellinus Igniarius Polysaccharide/chitosan-arginine Hydrogel for Promoting Diabetic Wound Healing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 249, 126014. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126014>
- Zhang, M., Xu, W., Li, X., Ling, G. & Zhang, P. (2023). Tunicate-mimetic Antibacterial Hydrogel Based on Metal Ion Crosslinking and Chitosan Functionalization for Wound Healing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 244(125062), 125062. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125062>

5. Historia de la simulación molecular

Gloria Arlette Méndez Maldonado¹

Iván Guillén Escamilla²

José Guillermo Méndez Bermúdez²

José Abundio Daniel Alva Tamayo²

Juan Carlos Mixteco Sánchez²

Resumen

Este trabajo pretende dar una visión general de la evolución de lo que denominamos simulación molecular (SM), sus bases y la importancia que ha adquirido para modelar diferentes tipos de sistemas en la ciencia y la ingeniería. Adicionalmente, se describirá el primer trabajo publicado que se tiene documentado a nivel internacional, así como sus inicios y desarrollo en México, llegando hasta los trabajos más recientes en este campo. Por otro lado, mencionaremos quiénes fueron los primeros investigadores en territorio nacional que utilizaron la SM para estudiar diversos sistemas físicos, así como su contribución en el desarrollo de este importante tópico. También, se describirá un sistema físico que se puede modelar mediante un pozo cuadrado y donde la SM será valiosa para calcular algunas propiedades interesantes de este. Finalmente, se describirá de manera general el auge que está teniendo el Machine Learning (ML) para mejorar los algoritmos en la SM.

Palabras clave: simulación molecular, dinámica molecular, pozo cuadrado, Machine Learning.

1 Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, esq. Calzada Olímpica, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México.

2 Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, Carretera Guadalajara-Ameca km. 45.5, C.P. 46600, Ameca, Jalisco, México.

1. Introducción

En la actualidad, se han producido avances rápidos en la aplicación de simulaciones moleculares (SM) al estudio de sistemas complejos. Las SM se utilizan ampliamente en diversas áreas de la física, la química, la biología, la ciencia de materiales, en la ingeniería e incluso en la medicina. Así, se podría decir que cada estudio realizado de forma puramente teórica puede ser tratado como una simulación. De esta manera, el comportamiento de cualquier sistema considerado puede modelarse utilizando diferentes enfoques computacionales. En primer lugar, para este propósito se suelen utilizar las teorías “habituales”, entre las que se encuentran teorías fenomenológicas simples, métodos cuánticos avanzados y sofisticados cálculos de termodinámica estadística. En segundo lugar, se aplica varios procedimientos especiales que permitan imitar sistemas reales y su evolución en el tiempo; concretamente la dinámica molecular, el método de Monte Carlo, autómatas celulares o algoritmos genéticos. Las técnicas de simulación más populares de este tipo son: la dinámica molecular y el método de Monte Carlo, donde se han producido avances impresionantes en el desarrollo de diferentes versiones de estos métodos (Allen & Tildesley, 2017).

La SM podría describirse como mecánica estadística computacional (Ciccotti *et al.*, 2022; Tuckerman, 2010); es decir, métodos numéricos combinados con ordenadores para abordar problemas que surgen en diversos sistemas físicos aplicados a diferentes áreas de la ciencia y la ingeniería, enfocándose principalmente en problemas físico-químicos. Dadas las leyes que gobiernan las interacciones entre los átomos o moléculas en estos sistemas físicos, utilizamos la SM para cuantificar una variedad de propiedades de los mismos; propiedades como la temperatura, los coeficientes de transporte, carga eléctrica, radio de giro, densidad, factor de forma, factor de estructura, transiciones de fase, desnaturalización de moléculas, etcétera.

En los sistemas estudiados se considera a los polímeros, los fármacos, compuestos de una especie o una combinación de varias de ellas; encontrándose en diferentes estados de la materia, en equilibrio o fuera de este; es decir, el área que incluye la materia condensada blanda. Una descripción detallada de las interacciones moleculares siempre es crucial en las simulaciones. Diversos campos de fuerzas se han desarrollado y

mejorado constantemente para estimar los potenciales de interacción entre átomos o moléculas. El campo de fuerza tradicional proporciona una función específica para la energía potencial junto a un conjunto de parámetros mejor ajustados. Dicho ajuste presenta resultados para propiedades obtenidas de la mecánica cuántica y, habitualmente, a determinados parámetros experimentales. Aquí, la precisión de la descripción de las interacciones moleculares mejora mediante el uso de potenciales obtenidos por medio de la herramienta de Machine Learning.

Como mencionamos, junto a las técnicas de simulación más populares, como son la dinámica molecular y el método de Monte Carlo, existen otras técnicas utilizadas para completar o predecir diferentes propiedades en sistemas físicos: la dinámica de partículas disipativas o los métodos *ab initio*, estos últimos pueden combinar la dinámica molecular con la química cuántica. En la dinámica molecular, las moléculas (o átomos) interactúan unas con otras mediante potenciales. Estos potenciales se manifiestan como fuerzas que actúan instantáneamente entre las moléculas, haciendo que estas cambien sus posiciones. En el momento en que estas posiciones relativas varían, se produce también un cambio en las fuerzas que actúan sobre cada molécula, haciendo que las posiciones varíen nuevamente, lo cual se convierte en un proceso cíclico entre interacción y movimiento. Esta técnica trabaja desde una aproximación de la física clásica de un sistema de partículas que interactúan entre sí, por lo cual en dinámica molecular las moléculas (o átomos) se mueven de acuerdo con las leyes de la mecánica clásica, más precisamente de acuerdo con la segunda Ley del Movimiento de Newton.

En el método de Monte Carlo, o simulación de Monte Carlo, las interacciones entre moléculas se dan a través de probabilidades, lo que nos proporciona la configuración más cercana a las condiciones impuestas. Es una técnica matemática que se utiliza para estimar los posibles resultados de un evento incierto. A diferencia de un modelo de pronóstico normal, el método de Monte Carlo predice un conjunto de resultados basados en un rango estimado de valores frente a un conjunto de valores de entrada fijos. En otras palabras, una simulación Monte Carlo crea un modelo de posibles resultados al utilizar una distribución de probabilidades, como una distribución uniforme o normal, para cualquier variable que tenga una incertidumbre inherente. Posteriormente, vuelve a

calcular los resultados una y otra vez, mediante un conjunto diferente de números aleatorios entre los valores mínimo y máximo. En un experimento típico de Monte Carlo, este ejercicio se puede repetir miles de veces para producir una gran cantidad de resultados probables.

Con esto, una pregunta que podría surgirnos es: ¿cuál de estas técnicas de simulación es la más útil? Así, a tiempos muy largos (para la dinámica molecular) y para un número bastante grande de configuraciones (para Monte Carlo) el Principio Ergódico nos permite relacionarlas, llegando a la conclusión de que, en este caso, ambas metodologías son equivalentes. Además, debemos tener claro que la ventaja de la dinámica molecular sobre Monte Carlo es que podemos obtener trayectorias y, por lo tanto, propiedades dependientes del tiempo. A su vez, la ventaja del método de Monte Carlo sobre la dinámica molecular es que podemos utilizar potenciales no continuos y aplicarlos a sistemas mucho más complejos (Allen & Tildesley, 2017).

En otra de las técnicas de simulación más utilizadas, la dinámica de partículas disipativas, debemos tener en cuenta que es una técnica de dinámica molecular que trabaja a un nivel mesoscópico, uniendo el esquema microscópico con el macroscópico, es decir es una técnica coarse-grained (CG, por sus siglas en inglés). Los modelos de CG suelen dedicarse al modelado computacional de moléculas específicas, como son las proteínas, ácidos nucleicos, membranas lipídicas, carbohidratos o agua. En estos modelos, las moléculas no están representadas por átomos individuales, sino por “pseudoátomos” que se aproximan a grupos de átomos, como pueden ser los residuos de aminoácidos completos. Al disminuir los grados de libertad, se estudian tiempos de simulación mucho más largos a expensas del detalle molecular (Liu *et al.*, 2015). Finalmente, los métodos de simulación *ab initio* utilizan la solución de las ecuaciones de Schrödinger para calcular la densidad y la energía electrónica, mientras que con la dinámica molecular se obtiene la posición de los núcleos, de tal manera que se tiene un modelo químico para cierto tipo de sistemas, como los sistemas biológicos (Friesner, 2005).

Por último, en el resto del artículo se presenta un esbozo de los primeros trabajos realizados en SM a nivel internacional. Además, en una de las secciones se discute el desarrollo de la SM en México, cuáles fueron los primeros problemas que se abordaron y qué grupos de investigación

fueron los primeros en hacerlo. También, se mencionan las diferentes metodologías que se han logrado aplicar a sistemas complejos, el tipo de software que implementan la dinámica molecular, el método de Monte Carlo o los métodos *ab initio*. Finalmente, se menciona como la técnica de Machine Learning (Unke *et al.*, 2021) actualmente se ha posicionado como la herramienta más novedosa para obtener campos de fuerza de compuestos ya existentes o nuevos materiales.

2. Primeras simulaciones a nivel internacional

Fue Metrópolis, en 1953, quien inicialmente propuso un método rápido para investigar ecuaciones de estado de algunos sistemas formados por moléculas individuales, los cuales interactuaban mediante interacciones a pares. Esto es, el potencial de las moléculas se asumía con simetría esférica, teniendo así un sistema de esferas duras (Metropolis *et al.*, 1953). Dicho método utilizaba una integración modificada de Monte Carlo sobre el espacio de configuración. Este trabajo fue el pionero en abordar problemas asociados con sistemas de moléculas, abriendo una nueva área de oportunidades en la física. Como podemos observar, desde el inicio de la simulación como herramienta para la investigación en materia condensada, se han utilizado modelos de sencillos para representar el potencial de interacción, para reproducir propiedades físicas elementales y estructurales. Los potenciales de interacción más utilizados son: el de Esfera Dura, el Pozo Cuadrado y el de Lennard-Jones. Los sistemas descritos por potenciales de esfera dura han sido de gran interés debido a los resultados que arrojan sobre fenómenos como las transiciones de fase o como sistemas de referencia, posibilitando calcular propiedades estructurales de manera analítica para fluidos complejos. Además, se han realizado diversos estudios extensos y cuidadosos; tanto por el método de Monte Carlo, como por métodos de dinámica molecular, de las propiedades de equilibrio de sistemas bidimensionales y tridimensionales de esfera dura (Hoover & Ree 1967; Chen *et al.*, 1969; Barker & Henderson, 1971; Young & Alder, 1974).

Como resultado de estos trabajos, se lograron conclusiones importantes, como qué sistemas de esferas duras, tanto bidimensionales como tridimensionales, muestran transiciones de fase de primer orden, de fluido a sólido, dependientes de la densidad. Para sistemas en tres

dimensiones, este resultado parece casi seguro desde los trabajos de Alder y Wainwright (1957) y Wood y Jacobson (1957). Para sistemas en dos dimensiones, los resultados de Alder también fueron reveladores al encontrar la coexistencia entre las fases sólida y líquida. Sin embargo, tal coexistencia no se había observado en sistemas tridimensionales, pues se requerían sistemas mucho más grandes, e imposibles de abordar con la herramienta computacional hasta ese momento. Sin embargo, una prueba convincente de la existencia de las dos fases fue dada por Hoover y Ree, quienes calcularon la energía libre de ambas fases mediante simulaciones de Monte Carlo y determinaron la presión y densidades de las fases coexistentes por métodos termodinámicos (Hoover & Ree, 1967; Hoover & Ree, 1968).

Otro de los potenciales más utilizados es el de Pozo Cuadrado, el cual, además de la contribución repulsiva de esfera dura, tiene una contribución atractiva, caracterizada por su alcance e intensidad. Para este potencial, se encuentran disponibles diversos resultados de Monte Carlo, donde se determinan propiedades termodinámicas y estructurales (Rotenberg, 1965; Lado & Wood, 1968; Henderson *et al.*, 1976). En estos trabajos se comparan los resultados obtenidos a través del formalismo de Monte Carlo, con los obtenidos mediante la solución de la ecuación de Ornstein-Zernike, utilizando diversas aproximaciones y cerraduras. En la mayor parte de estos trabajos se utiliza un alcance 1.5 veces el diámetro de las moléculas. Por otro lado, Alder y colaboradores (1972) y Andersen y colaboradores (1976), realizaron un amplio estudio de fluidos con Pozo Cuadrado mediante dinámica molecular, obteniendo datos sobre propiedades estructurales, los cuales son referencia en la actualidad.

De la misma forma, el potencial de Lennard-Jones, también conocido como potencial 6-12, es un poco más elaborado que los anteriores, pues cuenta con contribuciones repulsivas y atractivas; además de ser continuo. Debido a su forma funcional, es sencillo implementarlo en los algoritmos de simulación de Monte Carlo y de dinámica molecular. En trabajos más recientes donde están implicados fluidos tipo Lennard-Jones, las presiones, energías y funciones de distribución radial (RDF por sus siglas en inglés) han sido calculadas por simulaciones Monte Carlo y métodos de dinámica molecular. Uno de los primeros cálculos de Monte Carlo fueron los realizados por Wood y Parker (1957) para una isoterma

súper crítica; Verlet (1967) proporciona resultados de dinámica molecular para propiedades termodinámicas y, Verlet (1968) para RDF; incluida una serie extensa de datos donde se comparan las presiones y energías calculadas con las obtenidas mediante experimentos para argón. Para altas densidades, el acuerdo es realmente muy bueno. Sin embargo, las energías muestran discrepancias ligeras a volúmenes mayores, como cabría esperar de las discrepancias en los coeficientes del segundo coeficiente del Virial.

Las propiedades dinámicas de fluidos descritos por el potencial 6-12, han sido ampliamente estudiadas por Rahman (Rahman, 1964, 1968) y Levesque y Verlet (1970), usando el método de correlación de tiempo de equilibrio, y por Ashurst y Hoover (1975) con métodos de no equilibrio. Asimismo, Hoover y Ashurst (1975) ofrecen una discusión más detallada de sus métodos. Rahman, Levesque y Verlet encontraron coeficientes de difusión dentro del 15% de los valores experimentales para el argón, pero la viscosidad de corte calculada por Levesque y colaboradores (1973) para un estado termodinámico cercano al punto triple fue 30% más alto que el valor experimental para el argón. Los resultados de Ashurst y Hoover, indican que cuando se extrapolan apropiadamente a sistemas de ancho infinito, los resultados del equilibrio y del no equilibrio concuerdan entre sí con los datos experimentales para el argón. Este gran efecto de sistema finito parece ocurrir solo cerca del punto triple. Los resultados de "falta de equilibrio" tuvieron que ser corregidos por comportamiento no newtoniano por extrapolación a velocidad de corte cero. Ashurst y Hoover encontraron una buena concordancia entre sus viscosidades calculadas y los datos experimentales para el argón en una amplia gama de condiciones. Los métodos de no equilibrio parecen tener ventajas sustanciales en términos de requisitos de tiempo de computadora. Berne y colaboradores (1971) realizaron extensos estudios de dinámica molecular de líquidos no polares con moléculas diatómicas, con énfasis en propiedades dinámicas. El agua líquida fue estudiada extensivamente mediante simulaciones de dinámica molecular (Rahman & Stillinger, 1971; Stillinger & Rahman, 1972; 1974) y métodos de Monte Carlo (Barker & Watts, 1969; 1973; Watts, 1974; Kistenmacher *et al.*, 1973; Kistenmacher *et al.*, 1974; Lie & Clementi, 1975). Adicionalmente, Stillinger y Rahman realizaron estudios exhaustivos de las propiedades

estáticas y dinámicas utilizando potenciales empíricos mejorados sucesivamente. Por último, Clementi y colaboradores enfatizan el potencial del par, comenzando con los cálculos mecánicos cuánticos de Hartree-Fock e incluyendo los efectos de correlación.

2.1 Primeras simulaciones en México

Como hemos visto, con el desarrollo de las computadoras en la década de los años sesenta, se dio un auge en la implementación de las simulaciones computacionales para calcular propiedades electrónicas y estructurales de diversos sistemas físicos. Además, también contribuyó en el desarrollo de la biofísica molecular, lo cual tiene diversas aplicaciones en los campos de la medicina, genética y biotecnología, por citar solo algunos ejemplos. En general, dependiendo del tipo de propiedades que nos interese analizar para cualquier sistema físico, podemos utilizar simulaciones basadas en la mecánica clásica o en la mecánica cuántica. Para el primer caso, se implementa la simulación a través la solución de ecuaciones integro-diferenciales, la simulación de Monte Carlo clásico, la mecánica molecular o la dinámica molecular. Por otro lado, en el segundo caso usualmente se implementa la teoría de funcionales de la densidad (DFT por sus siglas en inglés) bajo ciertas aproximaciones o cálculos de primeros principios (*ab initio*). De esta manera, la SM permite investigar propiedades que usualmente no se podrían analizar de manera experimental, pues la precisión de los experimentos no alcanza la escala atómica. Así, la SM también es de suma utilidad para resolver problemas como la creación de fuentes de energía, en la industria de los alimentos y del petróleo, donde se ha usado para crear solventes que eliminen los componentes cancerígenos de las gasolinas. En esta sección mostraremos un breve recorrido de la historia de la SM en México, quiénes fueron los primeros investigadores en sumarse a su desarrollo, pasando por las primeras reuniones y concluyendo con el trabajo actual.

2.1.1 Auge de la simulación molecular en México

El desarrollo de la SM comenzó en México hace poco más de cuarenta años, siendo el doctor Gustavo Chapela Castañares de los primeros investigadores en incursionar en este campo con sus trabajos sobre simulaciones computacionales de superficies gas-líquido o soluciones

numéricas sobre mancuernas duras vibrantes. A partir de aquí, investigadores como Fernando del Río Haza, Luis Mier y Terán, José Luis Aguirre, José Alejandro, Esteban Martina, Sergio Martínez Casas, Enrique Fernández Fassnacht, Marcelo Lozada Cassou, Magdaleno Medina Noyola, por citar algunos, fueron los encargados de formar grupos de investigación enfocados en la implementación de la SM para resolver problemas, sobre todo en la parte de la mecánica estadística, termodinámica y fluidos.

Posteriormente, de los grupos formados por estos notables investigadores, comenzaron a surgir nuevos nombres, como José Méndez Alcaraz, Héctor Domínguez, Marcela Beltrán Sánchez, Alejandro Gil-Vilegas Montiel, Enrique Díaz Herrera, Ana Laura Benavides, Honorina Ruíz, Laura Yeomans Reyna, Heriberto Acuña Campa, Enrique Tovar, Martín Chávez Páez, Pedro González Mozuelos, Olegario Alarcón Waess, quienes se encargaron de llevar a la siguiente generación avances y nuevas técnicas de SM, las cuales avanzaban conforme lo hacía el desarrollo de procesadores para computadoras.

Fue precisamente el doctor Fernando del Río, después del trabajo realizado por el doctor Leopoldo García Colín Scherer, quien al término de una estancia posdoctoral en Estados Unidos, se incorporó al Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), llegando a la subdirección de investigación aplicada, la cual, para ese entonces ya contaba con un numeroso grupo de profesionales dedicados a la investigación y solución de problemas enfocados con la demanda tecnológica de Petróleos Mexicanos (PEMEX). En su paso por el IMP, realizó visitas a diversas plantas de PEMEX, logrando identificar posibles nuevas líneas de investigación y de aplicación innovadora del conocimiento. Por otro lado, fue en los inicios de las actividades de esta subdirección cuando emigraron de Puebla al IMP el doctor Joaquín Ferreira, pionero de la catálisis en México, y un grupo de más de diez estudiantes de la carrera de química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (Garritz Ruiz, 2013). Este grupo, fue pionero en México en señalar con toda claridad la necesidad de la investigación científica en el desarrollo tecnológico de una empresa, pero más importante aún, de él salieron aportaciones relevantes en las aplicaciones de la SM para resolver problemas reales en esta industria (García Colín, 2010).

2.1.2 Trabajo actual

Hoy en México se realizan diversas reuniones, escuelas, talleres y simposios donde los participantes discuten sobre tópicos que implementan las diferentes técnicas de SM, promoviendo su uso entre la comunidad científica de códigos y de la metodología necesaria para usar confiable y eficientemente programas como: NAMD, DL_POLY, LAMMPS, GROMACS, HooMD, Open_MM, que son “motores para dinámica molecular” (Molecular Dynamics Engines). Por ejemplo, NWChem es un código para hacer cálculos cuánticos de estructura electrónica, para determinar geometrías moleculares y parámetros del potencial de interacción y para realizar simulaciones de dinámica molecular sobre una PES cuántica que se actualiza en cada cierto. Dentro de estas reuniones se encuentra el Simposio de Simulación Molecular desde fluidos simples hasta proteínas; el taller de dinámica molecular; el Winter Meeting on Statistical Physics (que en 2023 llega a su 11 edición), por citar solo algunos.

Por otro lado, en México actualmente existen grupos reconocidos a nivel internacional que investigan en diversos tópicos utilizando técnicas de SM. Algunos de estos grupos se encuentran dentro de los departamentos de física y química de la Universidad Autónoma Metropolitana (Iztapalapa); los grupos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en centros de investigación tales como: Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Instituto de Investigaciones en Materiales, Instituto de Ciencias Físicas, Instituto de Física, Instituto de Química, e Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología; en el Instituto Politécnico Nacional (IPN); en el Centro de Investigación Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, en los departamentos de física, química, física aplicada (unidad Mérida) o en la unidad Querétaro. Adicionalmente, también se encuentran los grupos de Física Estadística de la Universidad de Guanajuato; el grupo de Mecánica Estadística de la Facultad de Física e Inteligencia Artificial en la Universidad Veracruzana; el grupo de investigación y materiales en el posgrado en Ciencias Físicas y del Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales de la Universidad de Sonora; los que se encuentran en las universidades autónomas de San Luis Potosí, Estado de México y de Guanajuato, así como el IPN, la UNAM y, desde luego, la Universidad de Guadalajara.

Finalmente, y de manera natural, los grupos que mencionamos al inicio de esta sección, se fueron fortaleciendo hasta llegar a consolidar la investigación de doctores como Orlando Guzmán, Esteban Castillo, Edgar Núñez Rojas, Eduardo Cerón, Bryan Gutiérrez, Patricia Mendoza Méndez, Luis Daniel Vargas, Edilio Lázaro, Cecilia Vargas Contreras, Pedro Ramírez González, Julio Armas Pérez, Martha Serrano Ocaña, Antonio Zárate, César Millán Pacheco, Valeria García Margarejo, Jorge Lozano Aponte, Thomas Scior, Alma Villalobos Osnaya, Salvador Tello Solís, entre otros, quienes actualmente se encuentran trabajando en nuevas técnicas y aplicaciones de la SM que permitan explotar los nuevos procesadores que se han desarrollado, una de estas nuevas aplicaciones la abordaremos en la siguiente sección y se le conoce como Machine Learning (ML).

3. Técnicas actuales en la simulación molecular

Las SM en sus últimos años han sido de gran ayuda, principalmente por el auge que tenemos en el poder de cómputo; sin embargo, existen cálculos complejos que consumen mucho tiempo de cálculo numérico, lo cual es particularmente adecuado para recientes aplicaciones como Machine Learning (ML, por sus siglas en inglés) o Deep Learning. El ML es una rama de la inteligencia artificial que se refiere a la capacidad de un sistema para imitar la forma en la que las personas aprenden, adquiriendo e integrando conocimiento a través de observaciones y datos que analizan automáticamente sin la intervención del ser humano (Woolf, 2009; IBM. s. f.).

Las nuevas herramientas del ML comienzan a tener un impacto significativo en el desarrollo de métodos aproximados para sistemas atómicos complejos, pasando por alto la solución directa de ecuaciones. El ML consiste en que se le muestra a la máquina un gran volumen de información en conjuntos de datos o imágenes que se encuentran asociadas por alguna característica. La idea es en que existe una relación compleja entre los datos de entrada y datos de salida que pueden inferirse mediante un algoritmo adecuado. De acuerdo con este principio, se realiza una extrapolación a la descripción de sistemas atómicos y moleculares; es decir, se sabe que las configuraciones atómicas dentro de una SM dictan las propiedades químicas, dinámicas y termodinámicas; entonces, la máquina aprende a asociar estas últimas con las primeras, si se le presentan suficientes ejemplos (Noé *et al.*, 2020).

El ML tiene diversas herramientas que pueden aplicarse a las SM, una de ellas son las redes neuronales o también conocida como Deep Learning, que permiten la definición basada en ejemplos de funciones arbitrariamente complejas y sus derivados. Como tal, el Deep Learning ofrece una alternativa para incorporar funciones de energía potencial en simulaciones de dinámica molecular, después del entrenamiento en bases de datos a gran escala obtenidas de enfoques más costoso computacionalmente. Una característica interesante de los potenciales de redes neuronales es que aprenden interacciones de muchos cuerpos y predicen las fuerzas y la energía total del sistema (Doerr *et al.*, 2021). Estos métodos a veces incluyen algoritmos clásicos de búsqueda y optimización para el aprendizaje automático, como Monte Carlo Tree Search en AlphaGO. En ML, el problema de minimización convexa o problema de optimización continua, pide que la "convexidad" sea una propiedad muy deseada en optimización, pues obtiene valores óptimos globales y no solo locales en diversos casos. Muchos autores han analizado este problema debido a sus aplicaciones en varios campos, como la ciencia de datos, la ciencia computacional, la estadística, la física, la ingeniería o la ciencia médica. Estas aplicaciones incluyen procesamiento de señales, reconstrucción de imágenes médicas, procesamiento digital de imágenes o la predicción y clasificación de datos.

4. Conclusiones

Como se observó, una descripción detallada de las interacciones moleculares siempre es crucial en las simulaciones moleculares. Diversos campos de fuerza se han desarrollado y mejorado permanentemente para estimar los potenciales de interacción entre átomos o moléculas. El campo de fuerza tradicional proporciona una función específica para la energía potencial y un conjunto de parámetros mejor ajustados. El potencial se ajusta, casi siempre, a los resultados obtenidos de la mecánica cuántica y, habitualmente, a determinadas mediciones experimentales. La precisión de la descripción de las interacciones moleculares se puede mejorar mediante el uso de potenciales obtenidos a través de aplicaciones tales como el ML. Adicionalmente, durante una simulación molecular típica, la trayectoria del sistema en el espacio de configuración se genera de forma estocástica, basándose en las leyes de la mecánica y las reglas

para aceptar estos estados tienen en cuenta los cambios en la energía del sistema.

Debemos entender que la excepcional popularidad de la dinámica molecular se debe, entre otros aspectos, a la disponibilidad de muchos paquetes de *software* listos para usar, que proporcionan los códigos de dinámica molecular principales en un conjunto de programas que realizan la mayoría de los pasos de la preparación para una simulación. El entorno es sencillo de utilizar y permite escribir los *scripts* de simulación sin la necesidad de un conocimiento profundo de procedimientos subyacentes. Sin embargo, extraer información confiable y útil de las simulaciones siempre requiere de mucho cuidado. Los resultados deben interpretarse a la luz de todos los conocimientos teóricos y prácticos disponibles, así como de los datos experimentales, para el sistema de estudio.

En este trabajo tratamos de presentar de manera sencilla un estudio sobre la importancia que ha tenido la simulación molecular en la comprensión de muchos sistemas físicos; prediciendo propiedades interesantes incluso antes de realizar los experimentos. En algún momento, es posible que se logren descubrir procesos microscópicos imprevistos que ningún modelo o teoría habrían anticipado sin la visión detallada que ofrece la SM. El poder de cálculo numérico cada vez mayor de las computadoras y el desarrollo de la programación moderna hacen de las SM una herramienta muy eficaz para estudiar sistemas cada vez más complejos. Finalmente, esperamos que este artículo refleje el poder de la SM como una herramienta efectiva en diversos campos de la ciencia y la ingeniería, de tal manera que logre proporcionar un impulso para estudios futuros.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a los Centros Universitarios de los Valles y de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Guadalajara por el apoyo para la realización de este trabajo, a la maestría y el doctorado en Ciencias Físico-Matemáticas con orientación en Nanociencias así como a Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca de doctorado otorgada para el estudiante J. D. A. Alva Tamayo.

Referencias

- Alder, B. J. & Wainwright, T. E. (1957). Phase Transition for a Hard Sphere System. *J. Chem. Phys.*, 27. <https://doi.org/10.1063/1.1743957>
- Alder, B. J., Young, D. A. & Mark M. A. (1972). Studies in Molecular Dynamics. X. Corrections to the Augmented van der Waals Theory for the Square Well Fluid. *J. Chem. Phys.*, 56, 3013.
- Allen, M. P. & Tildesley D. J. (2017). *Computer Simulation of Liquids*. Oxford University Press.
- Andersen, H. C., Chandler, D. & Weeks, J. D. (1976). Roles of Repulsive and Attractive Forces in Liquids: The Equilibrium Theory of Classical Fluids. *Adv. Chem. Phys.*
- Ashurst, W. T. & Hoover W. G. (1975). Dense-fluid Shear Viscosity Via Nonequilibrium Molecular Dynamics. *Phys. Rev.*, A11, 658.
- Barker, J. A. & Henderson D. (1971). Monte Carlo Values for the Radial Distribution Function of a System of Fluid Hard Spheres. *Mol. Phys.*, 21, 18. <https://doi.org/10.1080/00268977100101331>
- Barker, J. A. & Watts R. O. (1969). Structure of Water; A Monte Carlo Calculation. *Chem. Phys. Lett.*, 3, 144.
- Barker, J. A. & Watts, R. O. (1973). Monte Carlo Studies of the Dielectric Properties of Water-like Models. *Mol. Phys.*, 26, 792.
- Berne, B. J. (1971). Time-Dependent Properties of Condensed Media, vol. 8B, Chap. 9., en H. Eyring, D. Henderson, and W. Jost (eds.). *Physical Chemistry an Advanced Treatise: Liquid State*. Academic Press.
- Chen, M., Henderson, D. & Barker J. A. (1969). On the Relation between Perturbation Theory and Distribution Function Theories of Liquids. *Can. Phys.*, 47, <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/p69-254>
- Ciccotti, G., Dellago, C., Ferrario, M. et al. (2022). Molecular Simulations: Past, Present, and Future (a Topical Issue in EPJB). *Eur. Phys., J. B* 95, 3.
- Doerr, S., Majewski, M., Pérez, A., Krämer, A., Clementi, C., Noe, F., ... De Fabritiis, G. (2021). TorchMD: A Deep Learning Framework for Molecular Simulations. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 17(4), 2355-2363.
- Friesner, R. A. (2005). Ab Initio Quantum Chemistry: Methodology and applications. *PNAS.*, 102, 6648-6653.

- García Colín Scherer, L. (2010). La creación del departamento de física y química de la UAM-Iztapalapa. *Boletín de la Sociedad Química de México*, 4, 22-23.
- Garritz Ruiz, A. (2013). Leopoldo García-Colín Scherer. *Educ. Quím.*, 24(1), 86-87.
- Henderson, D. Madden, W. G. & Fitts, D. D. (1976). *J. Chem. Phys.*, 64, 5026.
- Hoover, W. G. & Ree, F. H. (1967). Melting Transition and Communal Entropy for Hard Sphere. *J. Chem. Phys.*, 47, 4873.
- Hoover, W. G. & Ree F. H. (1968). Melting Transition and Communal Entropy for Hard Spheres. *J. Chem. Phys.*, 49, 3609.
- Hoover, W. G. & Ashurst W. T. (1975). Dense-fluid Shear Viscosity Via Nonequilibrium Molecular Dynamics. *Theor. Chem.* 1, 1.
- Kistenmacher, H., Lie, G. C., Popkie, H. & Clementi, E. (1974). Study of the Structure of Molecular Complexes. VIII. Small Clusters of Water Molecules Surrounding Li^+ , Na^+ , K^+ , F^- , and Cl^- ions. *J. Chem. Phys.*, 61, 546.
- Kistenmacher, H., Popkie H. & Clementi, E. (1973). Study of the structure of Molecular Complexes. V. Heat of formation for the Li^+ , Na^+ , K^+ , F^- , and Cl^- ion Complexes with a Single Water molecule. *J. Chem. Phys.*, 5, 1325.
- Lado, F. & Wood, W. W. (1968). Dependence in Monte Carlo Studies of the Square-Well System. *J. Chem. Phys.*, 49, 4244.
- Levesque, D. & Verlet L. (1970). Computer "Experiments" on Classical Fluids. III. Time-Dependent Self-Correlation Functions. *Phys. Rev.*, A2, 2514
- Levesque, D., Verlet, L. & Kurkijarvi, J. (1973). Computer "experiments" on Classical Fluids. Iv. Transport Properties and Time-correlation Functions of the Lennard-jones Liquid near its Triple Point. *Phys. Rev.*, A7, 1690.
- Lie, G. & Clementi, E. (1975). Study of the Structure of Molecular Complexes. XII. Structure of Liquid Water Obtained by Monte Carlo Simulation with the Hartree-Fock Potential Corrected by Inclusion of Dispersion Forces. *J. Chem. Phys.*, 62, 2195.
- Liu, M. B., Liu, G. R., Zhou, L. W. & Chang, J. Z. (2015). Dissipative Particle Dynamics (DPD): An Overview and Recent Developments, *Arch. Comput. Methods Eng.*, 22, 529-556.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M., Teller, A. H. & Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J. Chem. Phys.*, 21, 1087-1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>

- Noé, F., Tkatchenko, A., Müller, K. R. & Clementi, C. (2020). Machine Learning for Molecular Simulation. *Annual Review of Physical Chemistry*, 71(1).
- Rahman, A. (1964). Correlations in the Motion of Atoms in Liquid Argon. *Phys. Rev. A* 136, 405.
- Rahman, A. (1968). Current Fluctuations in Classical Liquids, en *Neutron Inelastic Scattering* (pp. 561-572). International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Rahman, A. & Stillinger, F. H. (1971). Molecular Dynamics Study of Liquid Water. *J. Chem. Phys.*, 55, 3336.
- Rotenberg, A. (1965). Monte Carlo Equation of State for Hard Spheres in an Attractive Square Well. *J. Chem. Phys.*, 43, 1198.
- Stillinger, F. H. & Rahman, A. (1972). Molecular Dynamics Study of Temperature Effects on Water Structure and Kinetics. *The Journal of Chemical Physics*. 57, 1281-1292. DOI: 10.1063/1.1678388
- Stillinger, F. H. & Rahman, A. (1974). Improved Simulation of Liquid Water by Molecular Dynamics. *J. Chem. Phys.*, 60, 1545-1557. DOI: 10.1063/1.1681229 .
- Tuckerman, M. E. (2010). *Statistical Mechanics: Theory and Molecular Simulation*, Oxford Graduate Texts; Oxford University Press.
- Unke, O. T., Chmiela, S., Sauceda, H. E., Gastegger, M., Poltavsky, I., Schütt K. T., Tkatchenko, A. & Müller K. R. (2021). Machine Learning Force Fields. *Chem. Rev.*, 121, 10142-10186.
- Verlet, L. (1967). Computer "experiments" on Classical Fluids. I. Thermodynamical Properties of Lennard-Jones Molecules. *Phys. Rev.*, 159, 98.
- Verlet, L. (1968). Computer "Experiments" on Classical Fluids. II. Equilibrium Correlation Functions. *Phys. Rev.*, 165, 201.
- What is Machine Learning? | IBM. (s. f.). <https://www.ibm.com/topics/machine-learning>
- Watts, R. O. (1974). Monte Carlo Studies of Liquid Water. *Mol. Phys.*, 28, 1069.
- Wood, W. W. & Jacobson J. D. (1957). Preliminary Results from a Recalculation of the Monte Carlo Equation of State of Hard Spheres. *J. Chem. Phys.*, 27, 1207.
- Wood, W. W. & Parker, F. B. (1957). *J. Chem. Phys.*, 27, 720.
- Woolf, B. P. (2009). Machine Learning. Building Intelligent Interactive Tutors, 221-297.
- Young, D. A. & Alder, B. J. (1974). Studies in Molecular Dynamics. XVII. Phase Diagrams for "step" Potentials in Two and Three Dimensions. *J. Chem. Phys.*, 60, 1254.

6. Termodinámica de los agujeros negros: una revisión

César Álvarez Medina¹

Aldo Aparicio Martínez Merino¹

Roberto Alejandro Santos Silva¹

María Alicia López Osorio¹

Eric Martínez Pascual¹

Resumen

Este trabajo tiene como finalidad la revisión de la termodinámica de los agujeros negros. Comienza con una pequeña discusión sobre agujeros negros y de la solución de Kerr a las ecuaciones de Einstein, se establecen los resultados que llevaron a derivar una analogía entre las llamadas leyes de los agujeros negros con las leyes de la termodinámica. El propósito de este trabajo es discutir el por qué esta relación es más que la analogía ya mencionada.

Palabras clave: agujeros negros, termodinámica, Kerr.

Introducción

Un interés de la comunidad científica se ha intensificado con la primera imagen del horizonte de eventos de un agujero negro por la colaboración de Event Horizon Telescope (EHT, 2022). Esto se debe a que no solo ha sido la confirmación de que estos objetos circundan el universo, de que la teoría de la relatividad general (RG) sigue describiendo el universo que conocemos, sino también en el sentido astrofísico, abre las puertas al estudio más preciso de las galaxias tanto por su composición como su dinámica.

¹ Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, Carretera Guadalajara-Ameca km. 45.5, C.P. 46600, Ameca, Jalisco, México.

Las *ecuaciones de Einstein*, las cuales describen el comportamiento del campo gravitacional y su interacción con la materia, son un conjunto de seis ecuaciones para los diez componentes de la métrica de un espacio-tiempo 4-dimensional $g_{\mu\nu}$, totalmente acopladas de segundo orden en derivadas parciales. Explícitamente se escriben como

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

donde $R_{\mu\nu}$ es el *tensor de curvatura de Ricci*, R es el *escalar de curvatura*, y $T_{\mu\nu}$ es el *tensor de energía-momento*. Los tensores de curvatura se construyen a partir de contracciones del *tensor de curvatura de Riemann* $R_{\mu\nu\alpha\beta}$. Poco después de haberse propuesto estas ecuaciones, Schwarzschild encontró una solución para una distribución de masa esféricamente simétrica y estacionaria en el vacío, $T_{\mu\nu} = 0$. Conocida como la *métrica de Schwarzschild* (Schutz, 2009), tal solución es

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2), \quad (2)$$

con M la masa de esta distribución. Esta solución presenta dos singularidades para los valores del radio $r = 0$, y $r = r_s = \frac{2GM}{c^2}$, este último valor es conocido como el *radio de Schwarzschild*. Para cada uno de estos valores, $g_{tt} \rightarrow \infty$ para el primero, y $g_{rr} \rightarrow \infty$ para el segundo.

Por mucho tiempo se creyó que estas singularidades eran un problema del sistema de coordenadas utilizado y por lo tanto ficticias. Después de estudiar más a fondo este sistema, se encontró que la segunda singularidad es en verdad sobre coordenadas, dado que existe un sistema coordenado, como el de Kruskal, donde la métrica es suave en el valor correspondiente $r = r_s$. Pero, la teoría einsteniana es invariante bajo transformaciones de coordenadas y calcular una cantidad escalar bajo estas transformaciones mostraría qué tan esencial son estas singularidades. Un invariante de curvatura como el de Kretschmann, $R_{\mu\nu\alpha\beta} R^{\mu\nu\alpha\beta}$, hace el trabajo, y para la métrica de Schwarzschild este invariante depende del radio como r^{-6} . Así que, la singularidad $r = 0$ estaría presente en todo sistema coordenado. Calculando las componentes de la curvatura, en este

valor del radio se encuentra en que ellas divergen en general, entonces estaríamos ante una región del espacio-tiempo con una curvatura extremadamente grande.

Supongamos que esta solución describe una distribución esféricamente simétrica de masa, como la del sol, por ejemplo. Considerando la masa del mismo sol, encontramos que $r_s = 2.95 \times 10^3 \text{ m}$, mientras que su radio original es de $7 \times 10^8 \text{ m}$. Es decir, para el sol, el valor del radio de Schwarzschild es pequeño comparado con su radio. Así que los efectos de esta gran curvatura no serían notorios. Sin embargo, si la masa del sol se compacta de tal forma que la región que ocupa este sea tal que se encuentre después del radio de Schwarzschild, entonces, sí que estaríamos ante los efectos de esta curvatura como podemos apreciar a continuación.

De la métrica de Schwarzschild (2), uno puede calcular las trayectorias (o geodésicas) que siguen los rayos de luz tomando la expresión $\frac{ds}{dt} = 0$, donde t es el parámetro afín que recorre la trayectoria. Si consideramos el plano $t - r$, estas trayectorias satisfacen la ecuación²

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^2. \quad (3)$$

Estas geodésicas son, por tanto,

$$t + r^* = u \quad (t - r^* = v) \quad (4)$$

llamadas *entrantes* (*salientes*), donde

$$r^*(r) = r + 2M \log\left(\frac{r}{2M} - 1\right), \quad (5)$$

es la *coordenada tortuga*. Notemos que para el radio de Schwarzschild estas trayectorias no están definidas. Sin embargo, como esta singularidad es propia del sistema coordenado, es posible encontrar otro sistema coordenado donde estas trayectorias se pueden continuar más allá de este valor.

2 De ahora en adelante, se considera un sistema de unidades donde $c = G = k_B = 1$. De esta forma $r_s = 2M$.

Otro punto a notar es referente a la métrica. Cuando $r < r_s$, hay un cambio de signo entre la parte temporal y radial (propio del problema de definir el tiempo en R_G). Esto tiene como consecuencia que cualquier rayo de luz generado a una distancia menor que el radio de Schwarzschild, este tiene en su futuro la singularidad $r = 0$, inevitablemente. A la superficie a la distancia r_s se conoce por este motivo como el *horizonte de eventos*. Se acuñó el nombre de *agujeros negros*, a aquellas regiones del espacio-tiempo para las cuales ni siquiera la luz puede escapar de su influencia.

2. Agujero negro de Kerr

Como se mencionó en la introducción, la colaboración EHT mostró la foto del horizonte de eventos de un agujero negro. Fotos recientes han mostrado una característica esencial de estos objetos, que es la rotación que ellos tienen. Un agujero negro de Schwarzschild es estacionario y solo está descrito por su masa, así que no describiría aquel que encontró EHT. En la teoría de la formación de los agujeros negros, se espera que ellos tengan rotación, así que es necesario tener una solución que considere esto. De hecho, la foto fue capturada utilizando como modelo la *métrica de Kerr* que describe una distribución de masa esféricamente simétrica, pero con rotación, la cual estudiamos aquí.

La métrica de Kerr (1963) es una solución a las ecuaciones de Einstein en el vacío para una distribución de masa con momento angular. Esta métrica se expresa de muchas formas, cada una de ellas muestra una característica diferente de este agujero negro. Por ejemplo, la métrica de Kerr en la *forma de Boyer-Lindquist* (Boyer & Lindquist, 1967) es

$$ds_{BL}^2 = -\frac{\Delta}{R^2} (dt - a \sin^2 \theta d\Phi)^2 + \frac{\sin^2 \theta}{R^2} ((r^2 + a^2)d\Phi - a dt)^2 + \frac{R^2}{\Delta} dr^2 + R^2 d\theta^2, \quad (6)$$

donde $\Delta = r^2 + a^2 - 2Mr$, y $R^2 = r^2 + a^2 \theta^2$; se conoce como el *parámetro de Kerr*. Si el parámetro de Kerr es cero, de la forma de esta métrica recuperamos la métrica de Schwarzschild, por lo que es una genuina generalización a la métrica mencionada.

Un *vector de Killing* es considerado una simetría de la métrica, esto es, es un movimiento que se puede realizar en el espacio-tiempo que deja a la métrica invariante. Observamos que, como explícitamente la

métrica no depende de t y Φ , entonces los vectores de Killing son $\partial/\partial t$ y $\partial/\partial \Phi$. Por tanto, la métrica de Kerr es estacionaria y axialmente simétrica, por lo que describe un objeto en rotación.

Con respecto a las singularidades, en esta métrica se observa que hay dos, para $R^2 = 0$ y $\Delta = 0$. Calculando el invariante de Kretschmann para esta métrica se encuentra que $R_{\mu\nu\alpha\beta} R^{\mu\nu\alpha\beta} \sim (R^2)^{-6}$, por lo que la primera es una singularidad esencial, y la segunda es de coordenadas. De la definición de estas cantidades,

$$R^2 = 0 \Rightarrow r = 0 \text{ y } \theta = \frac{\pi}{2}. \quad (7)$$

En otra forma de la métrica, la forma euclidiana, se entiende que la singularidad de este agujero negro es una llamada *singularidad de anillo*, que se encuentra en el plano ecuatorial. Para la segunda singularidad, se tiene que

$$\Delta = r^2 + a^2 - 2Mr = 0 \Rightarrow r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2}. \quad (8)$$

Esta singularidad ubica dónde se encuentra el horizonte de eventos de este agujero negro. Además, observamos que de hecho son dos horizontes, dado que $r_- < r_+$, a r_+ (r_-) se le conoce como el *horizonte externo (interno)*. También es posible mostrar que dichos horizontes son *superficies nulas*, esto es, su vector gradiente siempre es tipo luz sobre dicha superficie, lo que corrobora que este sea el horizonte de eventos del agujero negro. De las raíces antes mostradas, tenemos la condición $|\alpha| \leq M$ para que ellas sean reales; el caso de la igualdad $M = \alpha$ se conoce como un *agujero negro extremal* de Kerr. Nuevamente observemos que el caso de Schwarzschild se recupera cuando $a = 0$.

Un análisis más detallado de la métrica muestra que en la región $r_- < r < r_+$ la métrica tiene un cambio de signatura, así que cualquier rayo de luz generado en esta región tiene en su futuro el horizonte interno, pero no la singularidad. Es curioso que en la región $0 < r < r_-$, esta vuelve a tener la signatura original. Es un tema abierto actualmente el comprender qué sucede en esta región, porque no se puede tener una interpretación directa de la física que se desarrolla ahí (ver sobre este punto Kerr, 2023).

2.1 El proceso de Penrose

Debido a la rotación del agujero negro, se plantea el problema de encontrar la distancia a la cual un observador podrá aún permanecer en reposo. Es decir, a qué distancia los observadores son arrastrados por la rotación del agujero negro. Esta condición se traduce en tener curvas para las cuales $(t, r_0, \theta_0, \phi_0)$, con r_0, θ_0, ϕ_0 son constantes. El elemento de línea se reduce de tal forma que el único coeficiente de la métrica que sobrevive es $g_{tt} = 1 - \frac{2Mr}{R^2}$, por lo que, igualando a cero, esta distancia es

$$r_{erg} = M + \sqrt{M^2 - a^2 \cos^2 \theta}, \quad (9)$$

la cual se conoce como la *ergoesfera*. Observamos que $r_+ < r_{erg}$, así que esta región está fuera del horizonte de eventos, y a diferencia de este, partículas que atraviesen la ergoesfera aún pueden salir de ella.

Esta región es interesante debido a un efecto que descubrió Penrose (Penrose & Floyd, 1971), el cual demuestra que puede extraerse energía del agujero negro a costa de su rotación, conocido como el *proceso de Penrose*. Hemos mencionado quiénes son los vectores de Killing, $K^\mu = \frac{d}{dt}$, y $R^\mu = \frac{d}{d\Phi}$. Así que, para la métrica de Kerr en la forma de Boyer-Lindquist (1967), una partícula tendrá una energía y momento angular dados por

$$\begin{aligned} E = -K_\mu p^\mu &= m_0 \left(1 - \frac{2Mr}{R^2} \right) \frac{dt}{d\tau} + \sin^2 \theta \frac{2m_0 Mar}{R^2} \frac{d\Phi}{d\tau}, \\ L = R_\mu p^\mu &= -\sin^2 \theta \frac{2m_0 Mar}{R^2} \frac{dt}{d\tau} + \frac{m_0 (r^2 + a^2)^2 - m_0 \Delta a^2 \sin^2 \theta}{R^2} \sin^2 \theta \frac{d\Phi}{d\tau}. \end{aligned} \quad (10)$$

Donde τ es el tiempo propio de la partícula, y m_0 su masa en reposo; el signo menos en la energía es para que esta sea positiva. Notemos que $K_\mu K^\mu = -(1 - \frac{2Mr}{R^2})$, por lo que K^μ es un cuadvectores temporaloides fuera de la ergoesfera. Sin embargo, dentro de la misma ergoesfera se convierte en un vector espacialoide, por lo que está permitido que la energía de la partícula sea negativa.

Consideremos la siguiente situación: una partícula proveniente del infinito con energía $E_{(0)}$ y cuadrimento $p^\mu_{(0)}$ entra en la ergoesfera desde el infinito, y ya dentro de ella se divide en dos subpartículas con cuadrimentos $p^\mu_{(1)}, p^\mu_{(2)}$. Por conservación de momento lineal, tenemos que

$$p^\mu_{(0)} = p^\mu_{(1)} + p^\mu_{(2)}, \quad (11)$$

por lo que tenemos para la energía que

$$E_{(0)} = E_{(1)} + E_{(2)}. \quad (12)$$

Ahora, supongamos que, de las subpartículas creadas, digamos la 1 cae al agujero negro con energía negativa, y la otra logra salir de la región de la ergoesfera, con energía

$$E_{(2)} = E_{(0)} - E_{(1)} = E_{(0)} - (-|E_{(1)}|) = E_{(0)} + |E_{(1)}|. \quad (13)$$

Esto es, la segunda partícula abandona la ergoesfera con una energía mayor que con la que entró. De hecho, como hemos asumido que la partícula con energía negativa es la que entra al agujero negro, la energía de este es $M - |E_{(1)}|$. Es decir, el agujero negro ha disminuido su energía en la misma cantidad. Lo anterior demuestra nuestra aseveración previa: es posible extraer energía del agujero negro.

¿Qué tanta energía se puede extraer del agujero negro? El cuadri-vector

$$\chi^\mu = K^\mu + \Omega_H R^\mu, \quad (14)$$

por ser una combinación lineal de vectores de Killing, es también un vector de Killing. Calculando su norma al cuadrado,

$$\chi_\mu \chi^\mu = - \left(1 - \frac{2Mr}{R^2}\right) - 2\Omega_H \frac{2Mar}{R^2} \sin^2\theta + \Omega_H^2 \frac{r^2 \sin^2\theta}{R^2}, \quad (15)$$

así que está orientado al futuro, pero se vuelve nulo precisamente en el horizonte de eventos, y es tangente a esta superficie. Con la partícula 1 cruzando el horizonte de eventos, con momento $p^\mu_{(1)}$,

$$\begin{aligned} 0 > p_{(1)\mu} \chi^\mu &= p_{(1)\mu} (K^\mu + \Omega_H R^\mu) = -E_{(1)} + L_{(1)} \Omega_H \\ &\Rightarrow L_{(1)} < \frac{E_{(1)}}{\Omega_H}, \end{aligned} \quad (16)$$

Así que, si la energía de la partícula es negativa, considerando la velocidad del agujero negro como positiva, entonces la partícula se encuentra con momento angular opuesto al del agujero negro, por lo que disminuye el momento angular de este último. Esto es, la extracción de energía es a costa de la rotación del agujero negro.

3. Las leyes de los agujeros negros y su termodinámica

Los resultados discutidos en la sección anterior llevaron a Bardeen, Carter y Hawking (1973) a establecer las llamadas *leyes de la mecánica de los agujeros negros* (Bardeen *et al.*, 1973), las cuales tienen la interpretación de ser las leyes de la termodinámica aplicada a los agujeros negros. Esto discutiremos en esta sección.

Un elemento importante en la teoría es calcular el área del horizonte de eventos del agujero negro. De la métrica de Boyer-Lindquist (1967), cuando tomamos un tiempo fijo, y el radio constante e igual a r_+ , el elemento de línea se reduce a

$$ds_H^2 = R_+^2 d\theta^2 + \frac{\sin^2 \theta}{R_+^2} (r_+^2 + a^2)^2 d\phi^2 = g_{\theta\theta} d\theta^2 + g_{\phi\phi} d\phi^2, \quad (17)$$

con $R_+^2 = r_+^2 + a^2 \cos^2 \theta$. De forma inmediata se calcula el área del horizonte, siendo esta igual a

$$A_H = \int d\theta d\phi \sqrt{\det g_{\mu\nu|H}} = \int d\theta \int d\phi \sqrt{g_{\theta\theta} g_{\phi\phi}} = 4\pi(r_+^2 + a^2) = 8\pi M r_+. \quad (18)$$

Esto es,

$$A_H = 8\pi (M^2 + \sqrt{M^4 - J^2}), \quad (19)$$

donde $J = Ma$ es el *momento angular del agujero negro*. Haciendo una variación infinitesimal de esta expresión con respecto a los parámetros de masa y momento angular del agujero negro, se tiene la expresión muy sugerente

$$\delta A_H = 8\pi \frac{r_+^2 + a^2}{\sqrt{M^2 - a^2}} \left(\delta M - \frac{a}{r_+^2 + a^2} \delta J \right), \quad (20)$$

Identificando las cantidades $\kappa = \frac{\sqrt{M^2 - a^2}}{r_+^2 + a^2}$ y $\Omega_H = \frac{a}{r_+^2 + a^2}$, entonces esta variación se reescribe como

$$\delta A_H = \frac{8\pi}{\kappa} (\delta M - \Omega_H \delta J). \quad (21)$$

Esta fórmula indica que el área del horizonte de eventos puede aumentar si enviamos una partícula sin momento angular, y decrecer si de alguna manera cambiamos el momento angular del agujero negro. De hecho, si consideramos el proceso de Penrose donde la partícula con energía $E_{(1)}$ y momento angular $L_{(1)}$ es engullida por el agujero negro, reconocemos a $\delta M = E_{(1)}$ y $\delta J = L_{(1)}$ como los cambios de la masa y momento angular del agujero negro. Ahora, de la desigualdad $\Omega_H L_{(1)} < E_{(1)}$ obtenemos que

$$\delta M - \Omega_H \delta J > 0. \quad (22)$$

Esto es, el área del horizonte nunca decrece. Este resultado se conoce como el *teorema del área*. La masa del agujero negro depende del área del horizonte y del momento angular de este de la siguiente forma,

$$M^2 = \frac{A_H}{16\pi} + \frac{4\pi J^2}{A_H}, \quad (23)$$

indicando que hay una cantidad mínima de masa que puede tener el agujero negro, que es el caso de disminuir su momento angular hasta que se anule. Lo que resta es la *masa irreducible*, dada por

$$M_{irr}^2 = \frac{A_H}{16\pi}. \quad (24)$$

Del teorema del área tenemos siempre que $\delta M_{irr} > 0$.

La ecuación (21) se reescribe de una manera físicamente sugerente, como

$$\delta M = \frac{\kappa}{8\pi} \delta A_H + \Omega_H \delta J, \quad (25)$$

que se conoce en la literatura como la *primera ley de los agujeros negros*³. Lo interesante de esta fórmula proviene de que es reminiscente de la primera ley de la termodinámica. El lado izquierdo de hecho se puede pensar como la energía interna de dicho agujero por la fórmula de Einstein, energía = masa. El segundo término del lado derecho tiene unidades de trabajo, de hecho, es el trabajo que realiza el agujero negro sobre una partícula que entra en su influencia. Así que, para establecer una analogía sensible, quedaría por interpretar el primer término. Una sugerencia proviene del teorema del área recientemente discutido.

Recordemos que la entropía S de un sistema abierto siempre aumenta, $\delta S > 0$. Mostramos anteriormente con el teorema del área que el área del horizonte de eventos también siempre aumenta. De hecho, siguiendo una línea de razonamiento parecida a la que seguimos en este documento Bekenstein (1973) mostró que los agujeros negros tienen entropía, y que ella está dada como

$$S_{BH} = \frac{A_H}{4}, \quad (26)$$

en las unidades que estamos manejando. Este resultado es interesante porque muestra que los agujeros negros tienen una física más rica de la que se pensaba, además de que la termodinámica, como una rama de la Física, es más universal, aplicable a una amplia gama de fenómenos naturales.

Bajo este escepticismo, Hawking (1975) ideó un cálculo que mostraría que las suposiciones hechas por Bekenstein (1973) eran erróneas. El cálculo consiste en resolver las ecuaciones de campo de un campo cuántico sobre el fondo del agujero negro (primero fue en un fondo tipo Schwarzschild). Lo que encontró Hawking (1975) fue que, debido a la enorme curvatura, alrededor del horizonte de eventos, el agujero negro cede energía al vacío del campo cuántico creando partículas. Así que el agujero negro radia (que es la ahora llamada *radiación de Hawking*), y lo hace

3 Esta forma de la primera ley es aplicable a este tipo de agujeros negros. Pero, es más general si el agujero negro está cargado. De hecho, tenemos el teorema de no-pelo que asegura que el agujero negro está descrito por su masa, su momento angular y su carga.

como un cuerpo negro, cuya temperatura, la *temperatura de Hawking*, está dada por

$$T_H = \frac{\kappa}{2\pi}, \quad (27)$$

el mismo parámetro κ de la ecuación (21), el cual definió como la *gravedad superficial*, o la aceleración que sentiría un observador sobre el horizonte de eventos. Así que el agujero negro sí tiene entropía, dada por la fórmula (26). Es decir, no solo Bekenstein (1973) estaba reivindicado, sino que además Hawking (1975) encontró otra pieza importante de esta analogía, la temperatura del agujero negro. Por tanto, el primer término de la primera ley de los agujeros negros se escribe como

$$T_H \delta S_{BH} = \frac{\kappa}{8\pi} \delta A_H. \quad (28)$$

Para finalizar esta sección, mencionaremos tres de las cuatro leyes de los agujeros negros, como las establecieron Bardeen, Carter y Hawking (1973).

- **Ley cero:** sobre todo el horizonte de eventos, la gravedad superficial es constante.
- **Primera ley:** la variación de la masa M de un agujero negro está relacionada con la variación de su área J , su momento angular Q y su carga por medio de la relación

$$\delta M = \frac{\kappa}{8\pi} \delta A_H + \Omega_H \delta J + \Phi_e \delta Q. \quad (29)$$

- **Segunda ley:** el área del horizonte de eventos de un agujero negro nunca decrece, $\delta A_H \geq 0$.

El potencial escalar Φ_e se interpreta como un *potencial químico*. Concluiré esta revisión con una discusión en la sección siguiente.

4. Discusión y conclusiones

Aparte de lo que se ha discutido en este trabajo, un agujero negro es un sistema físico bastante interesante desde muchos puntos de vista. Teóricamente, es un candidato natural para estudiar las implicaciones de gravedad cuántica, y asomarse a cómo se vería una teoría que armonice la Mecánica Cuántica con la Relatividad General. Desde el punto de vista astrofísico, son causantes de los fenómenos más violentos que suceden en el universo, por ejemplo, en la emisión de ondas gravitacionales resultado de la colisión de dos o más agujeros negros. Además, de la emisión de jets, de donde se han detectado radiación de muy alta frecuencia.

Debido a los puntos anteriores, describir estos objetos desde la perspectiva de la termodinámica abre un camino para entender más a fondo la física detrás de ellos. Por ello, concluir con la interpretación de las leyes de los agujeros negros en estos términos es importante. El que tengamos un resultado como el teorema del área nos habla de una irreversibilidad inherente a estos objetos: cualquier partícula que atraviese el horizonte de eventos no tiene posibilidad de salir. Un proceso como el de arrojar una partícula al agujero negro, es irreversible. Por esto, asociar la entropía del agujero negro como el área de su horizonte de eventos tiene todo el sentido físico. De hecho, cálculos realizados en teoría de cuerdas, o gravedad a lazos, arroja una idea de los posibles grados de libertad responsables de dicha entropía. Aunque se ha mostrado que el resultado de Bekenstein (1973) es universal, es decir que, cualquier teoría de gravedad cuántica debe de reproducir la relación entropía = área.

Por otro lado, está la ley cero, que la gravedad superficial sea constante sobre todo el horizonte de eventos nos habla de que para un agujero negro estacionario este ha llegado a un equilibrio con sus alrededores, así como un objeto llega al equilibrio termodinámico con sus alrededores.

La primera ley de los agujeros negros es la más clara en cuanto a mostrar que no estamos frente a una analogía, sino una aplicación de las leyes de la termodinámica a estos sistemas gravitacionales. Estudios más detallados desde este punto de vista se están llevando a cabo, y son un área de investigación altamente activa (Grumiller et al., 2015).

Agradecimientos

El cuerpo académico Física Matemática y Aplicaciones agradece a los organizadores del 4° Encuentro de Cuerpos Académicos en Ciencias e Ingeniería, del Centro Universitario de los Valles por la invitación a participar en este libro. Así también al revisor del manuscrito por sus valiosas contribuciones a la mejora de este escrito.

Referencias

- Bardeen, J. M., Carter, B. & Hawking, S. (1973). The Four Laws of Black Hole Mechanics. *Communications in Mathematical Physics*, 31, 161-170.
- Bekenstein, J. (1973). Black Holes and Entropy. *Physical Review D*, 7, 2333-2346.
- Boyer, R. H. & Lindquist, R. W. (1967). Maximal Analytic Extension of the Kerr Metric. *Journal of Mathematical Physics*, 8, 265-281.
- Event Horizon Telescope (s. f.). The Event Horizon Telescope is an international collaboration capturing images of black holes using a virtual Earth-sized telescope. <https://eventhorizontelescope.org/>
- Grumiller, D., McNees, R. & Salzer, J. (2015). Black Holes and Thermodynamics: The First Half Century, en X. Calmet (edit.), *Quantum Aspects of Black Holes. Fundamental Theories of Physics*, vol. 178.
- Hawking, S. (1975). Particle Creation by Black Holes. *Communications in Mathematical Physics*, 43, 199-220.
- Kerr, R. P. (1963). Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraic Special Metrics. *Physical Review Letters*, 11, 237-238.
- Kerr, R. P. (2023). Do Black Holes Have Singularities? arXiv:2312.00841 [gr-qc]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.00841>
- Penrose, R. & Floyd, R. M. (1971). Extraction of Rotational Energy from a Black Hole. *Nature Physical Science*, 229, 177.
- Schutz, B. (2009). *A First Course in General Relativity*. Cambridge University Press.

UNA EDICIÓN DE
typotaller
Barra de Navidad 76
Guadalajara, México
typotaller.com
typotaller@gmail.com

REVISIÓN ORTOTIPOGRÁFICA Y DE ESTILO

Ernesto Castro
Marlene Zertuche

DIGITALIZACIÓN
Laura Contreras

Ciencia y tecnología: una visión de los Cuerpos
Académicos del CUValles
se terminó de editar y digitalizar
en mayo de 2026



ISBN 978-607-646-004-7



9 786076 460047